

УДК 625.7/8

Научная статья

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-1-114-130>

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ВЫЧИСЛЕНИЯ ШТАМПОВЫХ МОДУЛЕЙ ДЕФОРМАЦИИ ГРУНТОВ

А.С. Пролыгин, А.Л. Калинин, А.С. Александров\*, Н.П. Александрова  
Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)

г. Омск, Россия

[aleksandrprolygin@mail.ru](mailto:aleksandrprolygin@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-1395-0553>,

[1exsandr55ne@mail.ru](mailto:1exsandr55ne@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0003-0291-2022>,

[aleksandrov00@mail.ru](mailto:aleksandrov00@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0003-2009-5361>,

[nata26.74@mail.ru](mailto:nata26.74@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-5534-6338>

\*ответственный автор

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Целью статьи является сравнительный анализ методов вычисления штамповых модулей деформации грунтов, регламентируемых различными стандартами РФ.

**Материалы и методы.** Экспериментальное определение модулей деформации грунта земляного полотна выполнено при помощи штамповых испытаний, которые произведены в грунтовом лотке путем нагрузки и разгрузки грунтового основания, уплотненного до требуемого коэффициента уплотнения 0,98. Нагрузка прикладывалась ступенями, а осадка штампа измерялась по завершению стабилизации деформации от каждой ступени. Критерием стабилизации деформации являлось снижение скорости деформации до 0,02 мм/мин и время приложения нагрузки, которое должно составлять не менее 120 с. После измерения упругопластических осадок грунта выполнена разгрузка модели. Разгрузка тоже произведена ступенями. В результате построены зависимости упругопластической и упругой осадки грунтовой модели земляного полотна от давления в виде петель гистерезиса.

**Результаты.** Расчеты значений модуля деформации грунта выполнены по различным методикам, регламентируемым стандартами Российской Федерации. Результаты расчета сгруппированы в выборки данных, которые обработаны методами математической статистики. При обработке данных каждая выборка проверена на наличие грубых ошибок. Выборки данных проверены на принадлежность одной генеральной совокупности. Для проверки принадлежности трех выборок к одной генеральной совокупности применен критерий Kruskal W.H. и Wallis W.A. На основании этого сравнения получены данные о значимости различий в выборках.

**Обсуждение и заключение.** Для определения модуля деформации грунта земляного полотна рекомендован способ вычисления модуля деформации по методике, предполагающей нелинейную зависимость деформаций от давлений, описываемую полиномом второй степени.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** земляное полотно, грунт, модуль деформации

Статья поступила в редакцию 30.08.2021; одобрена после рецензирования 14.02.2022; принята к публикации 28.02.2022.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

Конфликт интересов отсутствует.

Для цитирования: Пролыгин А. С. Сравнительный анализ методов вычисления штамповых модулей деформации грунтов / А. С. Пролыгин, А. Л. Калинин, А.С. Александров, Н.П. Александрова // Вестник СибАДИ. 2022. Т.19, № 1(83). С. 114-130. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-1-114-130>

© Пролыгин А.С., Калинин А.Л., Александров А.С., Александрова Н.П., 2022



Контент доступен под лицензией  
Creative Commons Attribution 4.0 License.

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-1-114-130>

Original article

## COMPARATIVE ANALYSIS OF METHODS FOR CALCULATING STAMP MODULES OF SOIL DEFORMATION

**Aleksandr L. Kalinin, Aleksandr S. Prolygin, Anatoliy S. Aleksandrov\*, Natalia P. Aleksandrova**

*Siberian State Automobile and Highway University (SibADI),*

*Omsk, Russia*

*aleksandrprolygin@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1395-0553>,*

*1exsandr55ne@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0291-2022>,*

*aleksandrov00@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2009-5361>,*

*nata26.74@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5534-6338>*

*\*corresponding author*

### ABSTRACT

**Introduction.** The purpose of the article is a comparative analysis of methods for calculating stamp modules of soil deformation regulated by various standards of the Russian Federation.

**Materials and methods.** The experimental determination of the deformation modules for the soil of the roadbed was performed using stamp tests. The tests were carried out in a soil tray by loading and unloading a soil base compacted to the required compaction coefficient of 0.98. The load was applied by steps, and the stamp draft was measured after completion of deformation stabilization from each step. The criterion for stabilizing the deformation was a decrease in the speed to 0.02 mm / min and the time of application of the load, which should be at least 120 s. After measuring the elasto-plastic draft of the soil, the model was unloaded. Unloading is also carried out by steps. As a result, the dependences of the elasto-plastic and elastic draft of the soil model of the roadbed from the pressure in the form of hysteresis loops are constructed.

**Results.** The calculations of the soil deformation modulus were performed according to the various methods regulated by the standards of the Russian Federation. The calculation results are grouped into data samples that are processed by mathematical statistics methods. When processing data, each sample is checked for the presence of gross errors. The data samples are checked for belonging to one general population. To check whether three samples belong to one general population, the Kruskal W. H. and Wallis W. A. criterion was applied. Based on this comparison, we made judgments about the significance of differences in the samples.

**Discussion and conclusions.** To determine the deformation modulus of soil and road pavements made of granular materials, a method for calculating the modulus of deformation using a method that assumes a nonlinear dependence of deformations on pressures, described by a second-degree polynomial is recommended.

**KEYWORDS:** roadbed, soil, deformation modulus

**The article was submitted 30.08.2021; approved after reviewing 14.02.2022; accepted for publication 28.02.2022.**

**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: Kalinin A.L., Prolygin A.S., Aleksandrov A.S., Aleksandrova N.P. Comparative analysis of methods for calculating stamp modules of soil deformation. The Russian Automobile and Highway Industry Journal. 2022; 19 (1): 114-130. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-1-114-130>*

© Kalinin A.L., Prolygin A.S., Aleksandrov A.S., Aleksandrova N.P., 2022



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

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время стандарты Российской Федерации ГОСТ 33382–2015<sup>1</sup>, ГОСТ Р 58818–2020<sup>2</sup>, ПНСТ 371–2019<sup>3</sup> разделяют автомобильные дороги общего пользования на две группы: дороги общего пользования и дороги с низкой интенсивностью движения. Такое разделение востребовано в практике дорожного строительства Омской области, в которой протяженность грунтовых дорог составляет 10022,3 км. Безусловно, что строительство дорожных одежд на такой большой протяженности грунтовых дорог требует экономичного использования материалов. Это достигается исследованием возможности и эффективности применения в дорожных конструкциях отходов промышленности и местных материалов. Специалистами ФГБОУ ВО «СибАДИ» выполнен большой объем экспериментальных работ по изучению свойств зол уноса и золошлаковых смесей [1, 2, 3], белитового шлама [4, 5, 6], грунтощебеночных смесей [7, 8] и геосинтетических материалов для армирования конструктивных слоев дорожных одежд [9, 10, 11, 12, 13, 14].

Для проектирования дорожных одежд дорог с низкой интенсивностью движения применяются две разные методики. Проектирование нежестких дорожных одежд капитального и облегченного типа с усовершенствованным покрытием выполняют по традиционной методике, в соответствии с которой расчет на прочность выполняется с применением трех критериев. Такими критериями является расчет конструкции в целом по допускаемому упругому прогибу и проверки по сопротивлению усталостному разрушению от изгиба монолитных слоев и сопротивлению сдвигу в грунте земляного полотна. Нежесткие дорожные одежды переходного и низшего типов проектируют по критериям прочности и эксплуатационной надежности. Расчет на прочность выполняют по упругопластической деформации, обеспечивая на поверхности покрытия требуемое значение общего модуля деформации. Расчет по эксплуатационной надежности выполняют определением глубины колеи и сравнивают ее величину с допустимым значением. Необходи-

мость отличий в расчетах слоев из монолитных и зернистых материалов упругого прогиба обсуждалась в работе [15], где отмечено, что традиционная методика вычисления общего модуля упругости основана на решении теории изгиба пластин. Поэтому в рамках нормативного расчета способностью работать на изгиб наделены как слои из монолитных материалов, так слои из зернистых материалов и песков. В действительности зернистые материалы и грунты работают в условиях трехосного сжатия, что требует вычисления перемещения их поверхности путем интегрирования вертикальной деформации по толщине слоя или глубине грунтового полупространства [15, 16, 17, 18].

Безусловно, что, решая задачи совершенствования методов расчета, изгибаемых асфальтобетонных слоев и слоев из зернистых материалов, а также грунтов земляного полотна, используются знания разных разделов механики. Расчеты дорожных одежд с асфальтобетонным покрытием и слоями из монолитных материалов развивают:

- созданием методов расчета изменения ровности под влиянием морозного пучения грунтов [19];
- совершенствованием усталостных теорий, применяя модели нелинейного накопления повреждений в цементобетонах [21] и асфальтобетонах [21, 22, 23];
- разработкой и совершенствованием механико-эмпирических методов по расчету глубин колеи [24, 25, 26].

Проблемой слоев дорожной одежды из зернистых материалов является образование колеи, которые образуются из-за накапливания остаточных деформаций в этих слоях и грунтах земляного полотна. Поэтому совершенствование расчетов дорожных одежд со слоями из таких материалов выполняют разработкой способов расчета остаточных деформаций [27, 28, 29, 30] или совершенствованием методов расчета по сопротивлению сдвигу [31] с уточнением параметров критерия Мора–Кулона и разработкой математических моделей, связывающих сцепление и угол внутреннего трения с влажностью [32].

<sup>1</sup>. ГОСТ 33382–2015. Дороги автомобильные общего пользования. Техническая классификация. Введен в действие 08.09.2016. Введен впервые. М.: Стандартинформ, 2019.

<sup>2</sup>. ГОСТ Р 58818–2020. Дороги автомобильные с низкой интенсивностью движения. Проектирование, конструирование и расчет. Введен в действие 15.04.2020. Введен впервые. М.: Стандартинформ, 2020.

<sup>3</sup>. ПНСТ 371–2019. Дороги автомобильные общего пользования с низкой интенсивностью движения. Дорожная одежда. Конструирование и расчет. Введен в действие 19.11.2019. Введен впервые. М.: Стандартинформ, 2019.

Проблема образования колеи актуальна для дорожных одежд на дорогах с низкой интенсивностью движения. Такие дороги имеют дорожные одежды, как правило, переходного или низшего типа. Покрытия таких дорог часто выполняют из зернистых материалов. Для уменьшения интенсивности накапливания остаточных деформаций в щебеночных слоях их армируют геосинтетическими материалами [9, 10, 11, 12, 13, 14, 33, 34, 35]. Кроме того, материалы и грунты стабилизируют или укрепляют вяжущими материалами [36, 37, 38, 39], в том числе с использованием технологий холодной регенерации покрытий [40, 41, 42, 43, 44].

Безусловно, что использование отходов промышленности и применение местных материалов в конструктивных слоях дорожной одежды и земляном полотне требует опреде-

ления их параметров прочности и деформируемости. Штампные модули деформации и упругости грунтов и материалов являются одним из важнейших параметров, применяемых при расчете дорожных одежд по прочности. Модуль деформации необходим при вычислении общего модуля деформации на поверхности дорожной одежды переходного и низшего типа для дорог с низкой интенсивностью движения. Модуль упругости слоев используют в традиционном расчете дорожных конструкций по критерию упругого прогиба.

В настоящее время для испытаний дорожных одежд применяют статические и динамические методы испытаний жестким круглым штампом и колесом автомобиля. На рисунке 1 приведено оборудование для динамических испытаний жестким круглым штампом.



Рисунок 1 – Установки динамического нагружения для штампных испытаний:  
а – ДИНА 3М; б – ДИНА 4; в – FWD Primax 1500 испытание тяжелой нагрузкой;  
г – УДН для испытание легкой нагрузкой.  
Составлено автором

Figure 1 – Dynamic loading units for stamp tests:  
a – DIN 3M; b – DIN 4; v – FWD Primax 1500 heavy load test; g – UDN for light load test.  
Compiled by the author

На рисунке 2 приведены результаты статических испытаний дорожных одежд колесом автомобиля и жёстким круглым штампом.

На рисунках 1 и 2 приведено оборудование, наиболее часто применяемое в России для определения параметров деформируемости грунтов и дорожных одежд. Основным отличием в методиках эксперимента является характер приложения нагрузки и контактные давления штампа с испытываемой поверхностью земляного полотна или дорожной одежды. При динамических испытаниях нагрузка прикладывается в виде удара путем сброса груза определенной массы с заданной высоты. Варьированием высоты сброса груза заданной массы имитируется величина статической нагрузки. Например, масса падающего груза установки ДИНА 3 М составляет  $160 \pm 2$  кг, а высота сброса груза рассчитана из условия воздействия нагрузки  $50 \pm 2,5$  кН. Таким образом, в установке ДИНА 3 М масса падающего

груза составляет около 160 кг, но за счет высоты сброса эта масса создает динамическое усилие, эквивалентное статической нагрузке 50 кН. Установка Дина 4 более совершенна, она способна варьировать высоту сброса груза, что позволяет выполнять испытания в диапазоне усилий 30...65 кН. Тем не менее динамические установки, показанные на рисунке 1, снабжены жестким круглым штампом, у которого форма эпюры контактных давлений имеет седлообразную форму с минимальной величиной давления в центре штампа и максимальной по краям. Следовательно, распределение давлений под жестким штампом коренным образом отличается от распределения давлений между слоями дорожных одежд и контактных давлений между поверхностями гибкого штампа и испытываемой поверхностью дорожной одежды. При испытаниях колесом автомобиля эпюра распределения контактных давлений полностью соответствует реально-

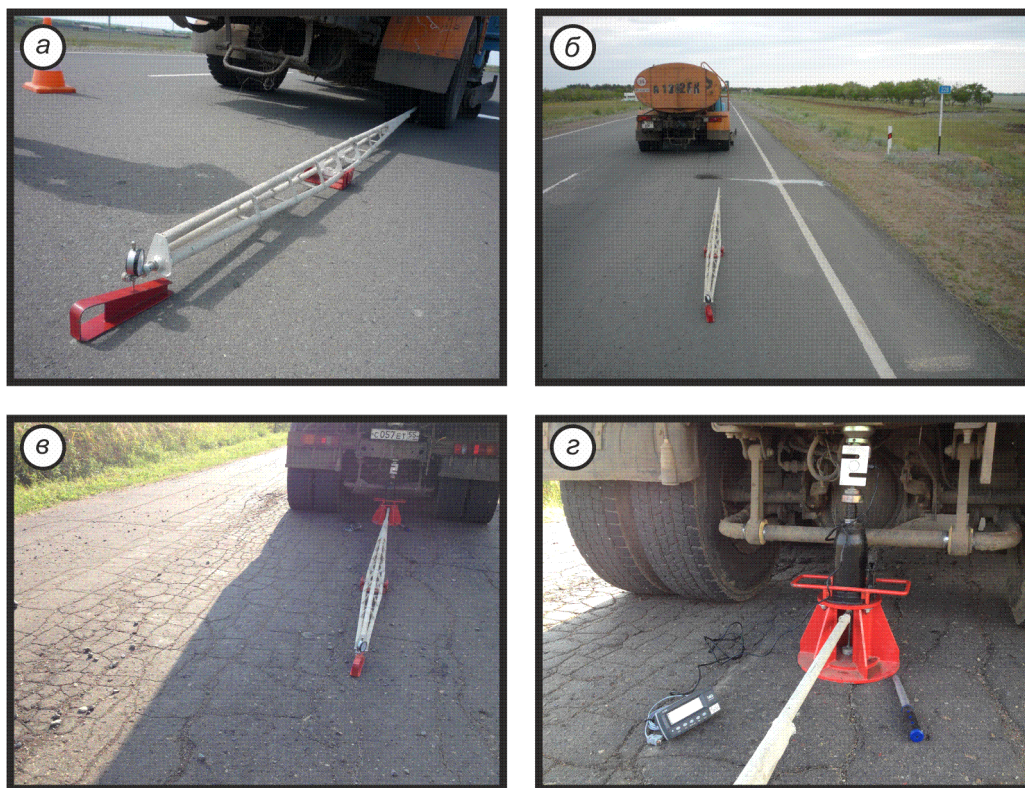


Рисунок 2 – Испытания дорожных одежд статической нагрузкой:  
 а и б – испытание колесом автомобиля стадии нагрузки и разгрузки соответственно;  
 в – общий вид штамповой установки при статических испытаниях;  
 г – детализированный вид установки прогибомера в тоннель штампа, динамометра и домкрата

Figure 2 – Tests of road pavement with static load:  
 a and b - testing with a car wheel of the loading and unloading stages, respectively;  
 c - a general view of the stamp installation during static tests;  
 d – a detailed view of the installation of the deflection meter in the tunnel of the stamp, dynamometer and jack

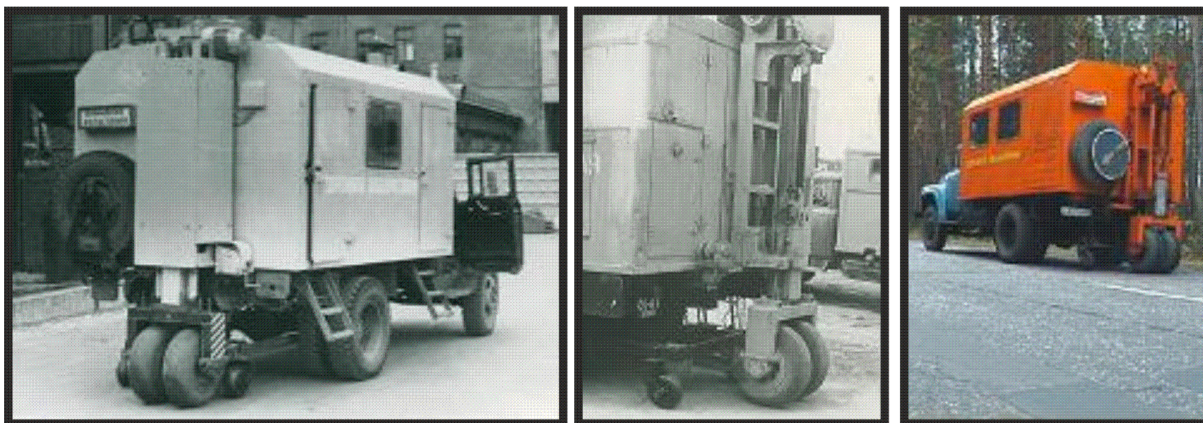


Рисунок 3 – Установка динамического нагружения нагрузка колесная

Figure 3 – Installation of dynamic loading wheel load

му воздействию, поэтому специалисты дорожной отрасли наиболее часто применяют метод испытания колесом автомобиля, используя в качестве измерительного оборудования балку Бенкельмана или ее российский аналог прогибомер. Отметим, что для динамических испытаний коллектив МАДИ разработал установку динамического нагружения с колесной нагрузкой УДН НК, она приведена на рисунке 3.

Установка динамического нагружения с колесной нагрузкой была выпущена сравнительно малой партией, вследствие чего испытания дорожных одежд выполняются преимущественно либо УДН ДИНА 3 М, либо УДН ДИНА 4. Тем не менее характер распределения контактных давлений является одним из ключевых вопросов при определении параметров прочности и деформируемости, а также характеристик напряженно деформированного состояния грунтов земляного полотна. Вычисление модуля деформации и модуля упругости грунтов земляного полотна и слоев дорожной одежды из зернистых материалов выполняется по классическим формулам, связывающих осадку линейно деформируемого или упругого полупространства со средним давлением от жесткого или гибкого штампа. В этом случае формулы для расчета осадок содержат коэффициент, учитывающий форму и жесткость штампа, а также местоположение точки под штампом (центр штампа, край прямоугольного штампа), относительно которой проводятся вычисления.

Обобщающая зависимость осадки от давления, воспринимаемого основанием от штампа, приводится в учебной литературе, например в учебнике Н. А. Цытовича<sup>4</sup>. Эта зависимость имеет вид:

$$S_z = w \cdot p \cdot (1 - \mu^2) \cdot \sqrt{F} \cdot E^{-1}, \quad (1)$$

где  $w$  – интегральный коэффициент, постоянный для данной формы площади подошвы и местоположения рассматриваемой точки;  $p$  – среднее давление, определяемое отношением нагрузки на штамп к его площади, Па;  $\mu$  – коэффициент Пуассона;  $F$  – площадь штампа, м<sup>2</sup>;  $E$  – модуль деформации при расчете общей упругопластической осадки или модуль упругости при расчете упругой осадки, Па.

В общепринятом виде выражение (1) записывают формулами:

$$S_z = \frac{w_{шт} \cdot p \cdot b \cdot (1 - \mu^2)}{E};$$

$$S_z = \frac{w_{шт} \cdot p \cdot D \cdot (1 - \mu^2)}{E}, \quad (2)$$

где  $w_{шт}$  – коэффициент формы площади подошвы и жесткости фундамента, одинаковый для всей площади или различный для ее разных точек, принимаемый по данным Ф. Шлейхера, Н. А. Цытовича и М. И. Горбунова-Посадова;  $b$  – ширина прямоугольного штампа, м;  $D$  – диаметр штампа, м.

<sup>4</sup>Цытович Н.А. Механика грунтов. М.: Высшая школа, 1983. 288 с.

Таблица 1  
Значения коэффициента  $w_{шт}$  по данным Н. А. Цытовича

Table 1  
Values of the  $w_{шт}$  coefficient according to N.A. Tsytovich

Форма штампа	$w_{шт}$ для полупространства				$w_{шт}$ для слоя ограниченной толщины при $h/b$ или $h/D$				
	$w_y$	$w$	$w_{cp}$	$w_{ж}$	0,25	0,5	1	2	5
Круглый	0,64	1,0	0,85	0,79	0,22	0,38	0,58	0,70	0,78
Квадратный	0,5 $w$	1,12	0,95	0,88	0,22	0,39	0,62	0,77	0,87
Прямоугольный при $h/b=2$	0,5 $w$	1,53	1,30	1,22	0,24	0,43	0,70	0,96	1,16
Прямоугольный при $h/b=3$	0,5 $w$	1,78	1,53	1,44	0,24	0,44	0,73	1,04	1,31
Прямоугольный при $h/b=4$	0,5 $w$	1,96	1,70	1,61	нет	нет	нет	нет	нет
Прямоугольный при $h/b=5$	0,5 $w$	2,10	1,83	1,72	нет	нет	нет	нет	нет
Прямоугольный при $h/b=10$	0,5 $w$	2,53	2,25	2,12	0,25	0,46	0,77	1,15	1,62

Значения коэффициентов формы площади подошвы и жесткости фундамента приведены в таблице 1.

Примечание:  $w_y$ ,  $w$  и  $w_{cp}$  – коэффициенты для осадок гибкого штампа в угловых точках ( $w_y$ ), максимальной под центром фундамента или штампа ( $w$ ) и средний по всей загруженной площади ( $w_{cp}$ );  $w_{ж}$  – коэффициенты для абсолютно жесткого фундамента (штампа); для слоя ограниченной толщины коэффициенты даны для средней осадки по всей загруженной площади при толщине слоя меньшей удвоенной эквивалентной толщины, определяемой по Н. А. Цытовичу.

Отметим, что представленное в таблице 1 значение коэффициента  $w_{ж}=0,79$  является приближенной величиной, а точное значение этого коэффициента определяется отношением числа  $\pi$  к 4. Сделав это замечание, запишем формулы для расчета осадок жесткого и гибкого круглых штампов. Эти формулы имеют вид:

$$S_{ж} = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{p_{ж} \cdot D \cdot (1 - \mu^2)}{E};$$

$$S_{г} = \frac{p_{г} \cdot D \cdot (1 - \mu^2)}{E},$$
(3)

где  $p_{ж}$  и  $p_{г}$  – средние давления от жесткого и гибкого штампа, определяемые отношением нагрузки к площади штампа.

Формулы (3) постулируют, что при равенстве средних давлений  $p_{ж}=p_{г}$  осадка жесткого штампа меньше осадки гибкого штампа. Зависимости (3) определяют применимость методов испытаний жестким и гибким штампом к расчету параметров грунтов в стадии их линейного деформирования. Например,

вычисление модуля деформации или упругости по зависимостям (3) производится путем решения этих уравнений относительно модуля деформации или упругости  $E$ . В этом случае получим известные формулы:

$$E = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{p_{ж} \cdot D \cdot (1 - \mu^2)}{S_{ж}};$$

$$E = \frac{p_{г} \cdot D \cdot (1 - \mu^2)}{S_{г}}.$$
(4)

Формулы (4) постулируют независимость модуля деформации или упругости грунта от штампа, свойства которого учитываются коэффициентом  $w_{шт}$ . Тем не менее эти формулы можно использовать только в диапазоне давлений, максимальная величина которых ограничена первой критической нагрузкой Н. М. Герсеванова. Соотношение между средними давлениями от жесткого и гибкого штампов для деформирования основания на одну и ту же величину можно получить из совместного решения (3). Приравняв эти зависимости и выполнив преобразования, получим

$$\frac{\pi}{4} \cdot \frac{p_{ж} \cdot D \cdot (1 - \mu^2)}{E} = \frac{p_{г} \cdot D \cdot (1 - \mu^2)}{E};$$

$$\frac{p_{г}}{p_{ж}} = \frac{\pi}{4}; \quad p_{г} = \frac{\pi}{4} \cdot p_{ж}; \quad p_{ж} = \frac{4}{\pi} \cdot p_{г}.$$
(5)

Формулы (5) постулируют соотношение между средними давлениями от гибкого и жесткого штампа для деформирования испытываемого основания на одну и ту же величину. Из этих зависимостей следует, что для деформирования осадки на одну и ту же вели-

чину среднее давление от гибкого штампа составляет примерно 79% от среднего давления от жесткого штампа. Формулы (5) применимы для пересчета первой критической нагрузки, определенной по результатам испытаний жестким круглым штампом, в первую критическую нагрузку от гибкого штампа. Из этих же формул следует, что первая критическая нагрузка от гибкого круглого штампа всегда меньше первой критической нагрузки от жесткого круглого штампа. Этот простой вывод обуславливает то, что напряжения, измеряемые в точках, расположенных на разной глубине оси симметрии по нагрузке гибкого круглого штампа всегда больше напряжений, расположенных в аналогичных точках на оси симметрии жесткого штампа того же диаметра.

Таким образом, формулы (4) постулируют правомерность применения моделей линейно-деформируемой среды и упругого полупространства к определению модуля деформации или упругости основания, но в тех случаях, когда осадка с давлением связана линейной зависимостью, то есть при давлениях, величина которых не превышает первую критическую нагрузку, правила определения которой даны в ГОСТ 20276.1–2020<sup>5</sup>. Формулы (5) постулируют необходимость выполнения экспериментального исследования напряжений и деформаций в точках по глубине дорожной конструкции гибким штампом или колесом автомобиля, выполняемых за рубежом на специальных кольцевых стендах [45, 46]. Это подтверждается анализом НДС в точках, под гибким и жестким штампом [47]. Тем не менее зависимости (5) могут оказаться полезными для специалистов дорожной отрасли, выполняющих исследования первой критической нагрузки жестким круглым штампом.

Методы штамповых испытаний, регламентируемые ПНСТ 371–2019 и ПНСТ 311–2018, для определения модуля деформации грунтов и материалов ориентированы на использование всей нелинейной зависимости осадки от давления. В этих документах применяются различные исходные зависимости осадки от давления, что определяет отличие формул для вычисления модулей деформаций. Отсюда вытекает актуальность работ, направленных на выбор наиболее рационального метода вычисления модуля деформации грунтов и материалов.

На основе такой острой необходимости целью нашей работы является статистический анализ модулей деформации, вычисленных по различным методам, оперирующим нелинейными экспериментальными зависимостями осадок от давления. Для достижения поставленной цели необходимо решить задачи:

Произвести штамповые испытания грунта земляного полотна в широком диапазоне давлений, получив экспериментальные нелинейные зависимости осадок от давлений.

Произвести вычисление нелинейного модуля деформации с использованием различных приемов его осреднения по величине давления или методов, регламентируемых ПНСТ 371–2019 и ПНСТ 311–2018.

Дать рекомендации по применению наиболее пригодной формулы для вычисления модуля деформации.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для решения поставленных задач были выполнены штамповые испытания грунта земляного полотна, отсыпанного в лотке грунтовой лаборатории. При выполнении испытаний использовали стандартную штамповую установку с гидравлическим домкратом, электронным динамометром и жестким круглым штампом диаметром 33 см. В ходе выполнения эксперимента выполнено испытание пяти точек грунта земляного полотна. Толщина модели отсыпанного земляного полотна составляет 1,2 м, что сопоставимо с четырьмя диаметрами штампа. Во избежание влияния на значения осадок грунтового массива бетонного дна лотка максимальная величина давления от штампа ограничена значением до 0,25 МПа. Такое ограничение допустимо предварительным национальным стандартом Российской Федерации ПНСТ 311–2018. Требования этого стандарта приняты за основу выполнения экспериментов, в соответствии с требованиями назначали величину ступеней при нагрузке и последующей разгрузке модели земляного полотна. Испытания выполнены при помощи штамповой установки, в состав которой входят упорная балка, нагрузочная плита (штамп), гидравлический домкрат, прогибомер, снабженный индикатором, а также приведена иллюстрация приложения нагрузки с контролем ее величины по электронному динамометру. Иллюстрации устройства модели земляного полотна и основных моментов штамповых

<sup>5</sup> ГОСТ 20276.1–2020. Грунты. Метод испытания штампом. Введен в действие 11.08.2020. Взамен ГОСТ 20276–2012 в части метода испытания штампом. М.: Стандартинформ, 2020.



Таблица 2  
 Формулы для расчета осадок и модулей деформации грунтов, регламентируемые государственными и предварительными национальными стандартами России

Table 2  
 Formulas for calculating settlements and deformation modulus of soils, regulated by state and preliminary national standards of Russia

Стандарт	Характеристика	Формулы для расчета
ГОСТ 20276.1–2020	Модуль деформации $E_d$	$E_d = (1 - \mu^2) \cdot K_1 \cdot D \cdot \frac{\Delta p}{\Delta S_z}$
ПНСТ 371–2019	Относительная садка грунта земляного полотна	$\lambda = \frac{S_z}{D}$
	Модуль деформации грунта земляного полотна $E_d$	$E_d = \frac{p}{\lambda}$
ПНСТ 311–2018	Осадка грунта земляного полотна	$S_z = a_0 + a_1 \cdot p_0 + a_1 \cdot p_0^2$
	Модуль деформации $E_d$	$E_d = \frac{0,75 \cdot D}{a_1 + a_2 \cdot p_{max}}$
	Модуль упругости $E_r$	$E_r = \frac{0,75 \cdot D \cdot p_{max1}}{S_{el}}$

где  $K_1$  – коэффициент, принимаемый для жесткого круглого штампа равным 0,79;  $\Delta p$  и  $\Delta S_z$  – соответственно приращения давления и осадки; где  $\lambda$  – требуемая величина относительной деформации, значение которой принимается в диапазоне  $\lambda=0,01 \dots 0,02$  для грунтов земляного полотна и  $\lambda=0,04 \dots 0,08$  для дорожных одежд;  $a_0$ ,  $a_1$  и  $a_2$  – постоянные многочлена второй степени;  $p_{max}$  – максимальная величина давления, переданного штампом на земляное полотно или дорожную одежду, при измерении, МПа;  $p_{max1}$  – максимальная величина давления достигнутая на стадии нагрузки, МПа

испытаний приведены нами в работе [8]. При расчете модуля деформации применяли формулы, представленные в таблице 2.

Нагрузка от каждой ступени выдерживалась в течение времени, необходимого для стабилизации осадки. Это время определялось по уменьшению скорости деформации грунтового земляного полотна до величины 0,02 мм/мин, но не менее чем 2 мин. По завершению стабилизации деформации прикладывали следующую ступень нагрузки, ожидая стабилизации осадки. Нагрузку прикладывали до тех пор, пока давление от штампа не достигнет значения 0,25 МПа. После чего выполняли разгрузку.

Результаты испытаний в каждой из пяти точек представляли в виде графической зависимости упругопластической и обратимой деформации от давления. Кривые упругопластической и обратимой осадок образуют петли гистерезиса, площадь которых равна потерянной энергии, перешедшей в тепло. Такие зависимости приведены на рисунке 4.

Вычисление модуля деформации выполнялось по каждой из трех формул, представленных в таблице 1. В результате расчета формировались три выборки частных значе-

ний штамповых модулей деформации грунта. Первая выборка содержит модули деформации, вычисленные по формуле, регламентируемой ГОСТ 20276.1–2020, но с одним отличием. По формуле, регламентируемой ГОСТ 20276.1–2020, нами определен нелинейный модуль деформации. Для этого вычисления выполнены для всех ступеней нагрузки. Методика вычисления штампового модуля деформации, регламентируемая ГОСТ 20276.1–2020, ориентирована на вычисление линейного модуля деформации. Для этого ГОСТ 20276.1–2020 определяет правила определения координат точек, ограничивающих начальный линейный участок криволинейной зависимости осадки от давления, после чего в расчет модуля деформации берутся точки (ступени), принадлежащие этому прямолинейному отрезку. Методики расчета модуля деформации, регламентируемой ПНСТ 311–2018, используют все точки криволинейной зависимости осадки от давления. Поэтому вычисление модулей деформации по формуле, регламентируемой ГОСТ 20276.1–2020, выполнено с учетом всех точек. Пояснение расчетов модуля деформации грунта по формулам таблицы 1 приведены в виде графических иллюстраций на рисунке 5.

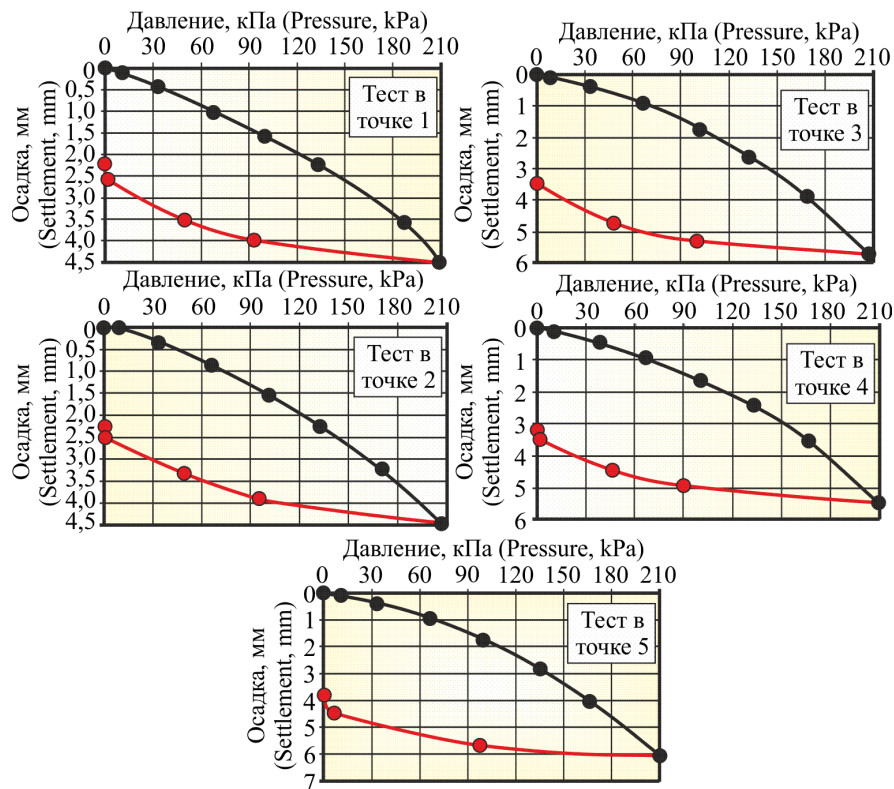


Рисунок 4 – Зависимость осадки от давления в виде петель гистерезиса

Figure 4 – Dependence of precipitation on pressure in the form of hysteresis loops

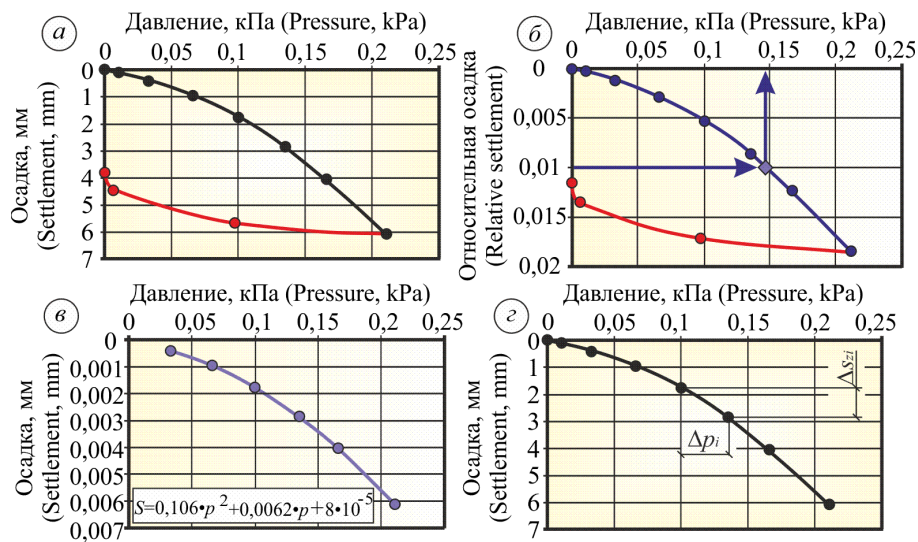


Рисунок 5 – Иллюстрации к вычислению модуля деформации:  
 а – зависимость осадки от давления в точке испытаний 5; б – зависимость относительной осадки от давления и определение давления соответствующего величине относительной осадки 0,01;  
 в – аппроксимация зависимости осадки от давления многочленом второй степени;  
 г – иллюстрация определения приращения осадки и давления от  $i$ -й ступени нагрузки

Figure 5 – Illustrations for calculating the deformation modulus:  
 а – dependence of settlement from pressure at test point 5; б – dependence of the relative settlement from pressure and determination of the pressure corresponding to the value of the relative settlement 0,01;  
 в – approximation of the dependence of settlement from pressure by a polynomial of the second degree;  
 г – illustration of determining the increment of settlement and pressure from the  $i$ -th stage of loading

На рисунке 5, а приведена экспериментальная зависимость осадок от давления, она построена по результатам испытаний в точке 5. На рисунке 5, б, в, г, приведены схематические пояснения к вычислению штамповых модулей деформации по методикам ПНСТ 371–2019, ПНСТ 311–2018 и ГОСТ 20276.1–2020. Для вычисления модуля деформации по методике ПНСТ 371–2019 необходимо вычислить относительные осадки  $\lambda$ , определяемые отношением осадки  $S_z$  к диаметру штампа  $D$ . Вычисленные значения относительных осадок используют для построения графика, иллюстрирующего зависимость таких относительных осадок от давления. Этот график показан на рисунке 5, б. При помощи такого графика определяют давление, соответствующее требуемой величине относительной осадки, которую принимают в диапазоне  $\lambda=0,01\dots0,02$ . На рисунке 5, б принято, что требуемая величина относительной осадки составляет  $\lambda=0,01$ . Тогда давление, соответствующее величине  $\lambda=0,01$ , достаточно просто определить по графику, оно приблизительно составляет  $p\approx0,15$  МПа. Далее по формуле таблицы 2, регламентируемой ПНСТ 371–2019, вычисляется величина модуля деформации. Анализируя этот способ, отметим, что при нелинейной зависимости относительной осадки от давления с увеличением требуемого значения относительной осадки  $\lambda$  от 0,01 до 0,02 вычисляемая величина модуля деформации будет уменьшаться.

При расчете модуля деформации по методике ПНСТ 311–2018 зависимость осадок от давления необходимо аппроксимировать многочленом второй степени, как показано на рисунке 5, в. При этом первые две точки графика при аппроксимации не учитываются. Из этих двух точек, первая точка является началом координат, а вторая связывает наименьшую осадку с минимальным давлением, прикладываемым для пригрузки земляного полотна в начале испытаний. В результате аппроксимации вычисляют значения коэффициентов полинома второй степени. Согласно данным рисунка 5, в значения этих коэффициентов составляют:  $a_0=8\cdot10^{-5}$ ,  $a_1=0,0062$  и  $a_2=0,106$ . Значения коэффициентов  $a_1$  и  $a_2$  используют для вычисления модуля деформации, а расчет выполняют по формуле таблицы 2, регламентируемой ПНСТ 311–2018. На рисунке 5, г представлена иллюстрация определения модуля деформации по методике ГОСТ 20276.1–2020. Согласно этой методике предварительно необходимо определить приращения давлений от

ступеней нагрузки  $\Delta p_i$  и соответствующие им приращения осадок  $\Delta S_{zi}$ . Далее для соответствующих приращений давлений  $\Delta p_i$  и осадок  $\Delta S_{zi}$  по формуле таблицы 2, регламентируемой ГОСТ 20276.1–2020, вычисляются модули деформации  $E_{di}$ . Для этой методики характерно уменьшение величины модуля деформаций при использовании в расчете приращений давлений  $\Delta p_i$  и осадок  $\Delta S_{zi}$ , соответствующих возрастанию осадок.

Учитывая специфику расчетов модуля деформации по методикам ГОСТ 20276.1–2020 и ПНСТ 371–2019, состоящую в зависимости величины модуля деформации от осадки, нами вычислены средние значения этих деформационных характеристик. При использовании методики ПНСТ 371–2019 вначале вычисляли максимальное значение модуля деформации  $E_{dmax}$ , которое соответствует относительной осадке  $\lambda=0,01$ . Затем рассчитывали минимальное значение модуля деформации  $E_{dmin}$ , оно получается либо при относительной осадке  $\lambda=0,02$ , либо при максимальной величине относительной осадки  $\lambda_{max}$ , измеренной при испытании, меньшей значения 0,02, но большей величины 0,01, то есть  $0,01 < \lambda_{max} \leq 0,02$ . Расчет среднего значения модуля деформации по методике ПНСТ 371–2019 выполняли по формуле

$$E_d = \frac{E_{dmin} + E_{dmax}}{2}. \quad (6)$$

При расчете модуля деформации по методике ГОСТ 20276.1–2020 производили вычисление модулей деформаций для каждой ступени нагрузки  $E_{di}$ , используя соответствующие этой ступени приращения осадки и давления. На завершающем этапе производили расчет усредненной по осадке величины модуля деформации. В этом случае применяли формулу

$$E_d = \frac{\sum_{j=1}^n E_{di} \cdot \Delta S_j}{\sum_{j=1}^n \Delta S_j}. \quad (7)$$

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты испытаний представляли в виде выборок модулей деформации. Общее число выборок равно количеству методов расчета модуля деформации, то есть 3 выборки. Каждая выборка состояла из пяти частных значений модуля деформации, полученных расчетом при использовании экспериментальных данных в соответствующих точках измерений. Каждая выборка данных проверена на нали-

Таблица 3  
Результаты статистической обработки

Table 3  
Results of statistical processing

Статистическая характеристика		Величина характеристики при применении методики расчета модуля деформации		
		ГОСТ 20276.1–2020	ПНСТ 371–2019	ПНСТ 311–2018
Частное значение модуля деформации по точкам испытаний $E_{di}$ , МПа	1	9,9	16,5	12,1
	2	9,7	16,3	11,7
	3	7,4	14,2	9,2
	4	7,8	14,6	10,2
	5	7,1	13,2	8,7
Среднее значение $E_d$ , МПа		8,4	15,0	10,4
Среднеквадратическое отклонение $S$ , МПа		1,3	1,4	1,5
Наибольшее значение $ E_d - E_{di} $ , МПа		1,5	1,8	1,7
Значение статистического критерия $v$ при числе определений $n=5$ и двухсторонней доверительной вероятности $F=95\%$		1,92	1,92	1,92
Значение критерия $v \cdot S$		2,5	2,7	2,9
Выполнение критерия $ E_d - E_{di}  > v \cdot S$		нет	нет	нет
Вывод о наличии грубых ошибок в выборке		ошибок нет	ошибок нет	ошибок нет
Коэффициент вариации $V$ , %		15,7	9,4	14,4
Выполнение критерия $V < V_{lim}$ , $V_{lim} = 30\%$		да	да	да
Вывод о применимости нормального закона распределения случайной величины		да	да	да
Коэффициент $t_{\alpha}$ при числе степеней свободы $K=4$ и двухсторонней доверительной вероятности $F=95\%$		2,78	2,78	2,78
Расчетное значение	минимальное	6,7	13,2	8,5
	максимальное	10,0	16,7	12,2

чие грубых ошибок с использованием стандартного критерия отсева. Кроме того, сравнением коэффициента вариации с его предельной величиной выполнена грубая оценка применимости нормального закона распределения случайной величины. На завершающем этапе определены расчетные значения модулей деформации, вычисляемых по разным методикам. Результаты статистической обработки приведены в таблице 3.

Из анализа данных таблицы 3 следует, что средние и расчетные значения модулей деформации, вычисленные по формулам разных стандартов, существенно отличаются, поэтому при определении деформационных характеристик необходимо обосновать методику вычисления модуля деформаций по измеренным осадкам и давлениям.

Для такого обоснования выполним проверку трех выборок на принадлежность одной генеральной совокупности. Так как количество частных значений модуля деформации во всех

выборках одинаково, то в наших целях можно использовать ранговый критерий W.H. Kruskal, W.A. Wallis [48]. Критерий W.H. Kruskal, W.A. Wallis [48] представляет собой непараметрическую альтернативу критерию Фишера. Этот критерий основан на оценке разностей между с медианами ( $c > 2$ ) и является обобщением рангового критерия Уилкоксона [49].

При применении критерия [48] необходимо заменить наблюдения в выборках их объединенными рангами. При этом первый ранг соответствует наименьшему наблюдению, а последний ранг соответствует наибольшему наблюдению. Если некоторые значения повторяются, им присваивается среднее значение их рангов.

Применение критерия W.H. Kruskal, W.A. Wallis [48] основано на вычислении статистики  $H$ . Расчет производят по формуле

$$E_d = \frac{\sum_{j=1}^n E_{di} \cdot \Delta S_j}{\sum_{j=1}^n \Delta S_j} \quad (8)$$

Таблица 4  
Частные значения модуля деформации и соответствующие им ранги

Table 4  
Particular values of deformation modulus and their corresponding ranks

Выборка 1 (GOST 20276-2012)		Выборка 2 (PNST 311-2018)		Выборка 3 (PNST 371-2019)	
$E_{дi}$ , МПа	Ранг	$E_{дi}$ , МПа	Ранг	$E_{дi}$ , МПа	Ранг
7,1	1	8,7	4	13,2	11
7,4	2	9,2	5	14,2	12
7,8	3	10,2	8	14,6	13
9,7	6	11,7	9	16,3	14
9,9	7	12,1	10	16,5	15
$T_1$	19	$T_2$	36	$T_3$	65

где  $n$  – общее количество наблюдений в выборках,  $n_j$  – количество наблюдений в  $j$ -й выборке ( $j = 1, 2, \dots, c$ ),  $T_j$  – сумма рангов  $j$ -й выборки.

Частные значения модулей деформации и соответствующие им ранги приведены в таблице 4, в которой также подсчитаны суммы рангов по каждой выборке.

После присвоения рангов, представленных в таблице 4, и вычисления их суммы в каждой выборке:  $T_1 = 19$ ;  $T_2 = 36$ ;  $T_3 = 65$  выполняется проверка рангов. Для этого проверяют выполнение уравнения

$$\sum_{j=1}^c T_j = \frac{n \cdot (n + 1)}{2}. \quad (9)$$

Выполнив проверку, убедимся, что

$$\sum_{j=1}^c T_j = 19 + 36 + 65 = 120;$$

$$\frac{15 \cdot (15 + 1)}{2} = 120.$$

Следовательно, ранги присвоены правильно, можно вычислять статистику  $H$ .

$$H = \left[ \frac{12}{15 \cdot (15 + 1)} \cdot \left( \frac{19^2}{5} + \frac{36^2}{5} + \frac{65^2}{5} \right) \right] -$$

$$- 3 \cdot (15 + 1) = 10,82.$$

Критическое значение критерия Kruskal–Wallis при уровне значимости  $\alpha=0,05$  для случая сравнения 3 выборок с пятью частными значениями наблюдений в каждой выборке составляет  $H_\alpha=5,78$ .

Так как выполняется условие  $H \geq H_\alpha$  ( $10,82 > 5,78$ ) нулевую гипотезу о случайных различиях выборок по уровню исследуемого

признака отклоняем. Следовательно, выборки нельзя объединить в одну совокупность.

### ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненных экспериментов и статистической обработки их экспериментальных данных установлено, что выборки частных значений модулей деформации, вычисленные по трем разным методикам, имеют существенные различия. Применение критерия Kruskal–Wallis показало, что сравниваемые выборки нельзя объединить в одну совокупность, следовательно, необходимо выбрать методику вычисления модуля деформации грунта. Из анализа методик вычисления модуля деформации следует, что расчет по формулам ПНСТ 311–2018 базируется на нелинейной зависимости осадки от давления, представляющей собой полином второй степени. Постоянные коэффициенты этого полинома легко определяются при регрессионном анализе.

В связи с этим для вычисления модуля деформации нами рекомендуется применение методики, регламентируемой ПНСТ 311–2018. Статистическая обработка данных экспериментов позволяет определять математическое ожидание модуля деформации и его расчетные значения. При этом в целях повышения надежности расчета дорожных одежд можно принимать минимальное расчетное значение модуля деформации.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лунёв А. А., Сиротюк В. В., Барац Н. И. Экспериментальные исследования прочностных характеристик золошлаковой смеси // Вестник СибАДИ. 2016. № 6 (52). С. 72–79.
2. Лунёв А. А., Сиротюк В. В., Иванов Е. В. Результаты исследований деформационных харак-

- теристик золошлаковых смесей // Вестник СибАДИ. 2017. № 1 (53). С. 103–110.
3. Лунёв А. А., Сиротюк В. В. Сопоставление деформационных параметров золошлаковой смеси, полученных в лабораторных и натуральных условиях // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2019. № 2(21). С. 215–227.
  4. Лыткин А. А., Старков Г. Б., Вагнер Е. Я. Исследование эффективности использования белитового шлама для устройства монолитных слоев дорожных одежд методом холодного ресайклинга // Вестник СибАДИ. 2020. № 6, Т.17. С. 764–776.
  5. 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.
  6. Lytkin, A.A.: Study of the Transport Loads Influence on the Nature of Belite Sludge Hardening in Pavement. *Materials Science Forum* 992, 79–85 (2020).
  7. Пролягин А. С., Долгих Г. В., Калинин А. Л., Александрова Н. П. Влияние влажности грунта на деформационные свойства грунтощебеночных образцов при сжатии // Вестник СибАДИ. 2021. № 18(5). С. 614–632. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-5-614-632>.
  8. Пролягин А. С., Александров А. С., Долгих Г. В., Чусов В. В. Влияние содержания щебня на модуль деформации грунтощебеночного слоя // Вестник СибАДИ. 2021. № 18(6). С. 772–789. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-6-772-789>
  9. Матвеев С. А., Немировский Ю. В. Свойства упругого слоя основания, армированного объёмной георешеткой // Наука и техника в дорожной отрасли. 2005. № 2(33). С. 24–28.
  10. Матвеев С. А., Литвинов Н. Н. Определение деформационных характеристик щебеночно-песчаного основания, армированного стальной геосеткой // Вестник СибАДИ. 2013. № 4(32). С. 57–61.
  11. Матвеев С. А., Мартынов Е. А., Литвинов Н. Н. Экспериментально-теоретические исследования армированного основания дорожной одежды // Вестник СибАДИ. 2015. № 44(4). С. 80–86.
  12. Matveev, S.A., et al: The geogrid-reinforced gravel base pavement model. *Magazine of Civil Engineering* 94(2), 21–30 (2020).
  13. Matveev, S.A., Martynov, E.A., Litvinov, N.N.: Determine the reinforcement effect of gravel layer on a sandy foundation. *Applied Mechanics and Materials* 662, 164–167 (2014).
  14. Matveev, S.A., Martynov, E.A., Litvinov, N.N.: Effect of Reinforcing the Base of Pavement with Steel Geogrid *Applied Mechanics and Materials* 587–589, 1137–1140 (2014).
  15. Chusov, V.V., Aleksandrova, N.P., Ignatov, V.F.: Calculation of road clothes by elastic deflection criteria taking into account damage to asphalt concrete. In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 687(2), 1–7 (2019).
  16. Hirakawa, D., et al.: Relationship between sand ground stiffness values from FWD and from plate loading tests. *Japanese Geotechnical Journal* 3(4), 307–320 (2008) (in Japanese).
  17. Kongkitkul, W., et al.: Evaluation of static-equivalent stiffness by a simple falling weight deflectometer. *ATRANS Research* 2(1), 1–14 (2010).
  18. Aleksandrov, A.S., Semenova, T.V., Aleksandrova, N.P.: Calculation of Residual Deformations of Granulated Materials from Exposure to Repeated Loads. *Materials Science Forum* 992, 828–835 (2020).
  19. Churilin, V., Efimenko, S., Matvienko, O., et al.: Simulation of stresses in asphalt-concrete pavement with frost heaving. In: MATEC Web of Conferences 216, 1–9 (2018).
  20. Chen, Y., Chen, X., Bu, J.: Nonlinear damage accumulation of concrete subjected to variable amplitude fatigue loading. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences* 66(2), 157–163 (2018).
  21. Xu, X., New Damage Evolution Law for Steel–Asphalt Concrete Composite Pavement Considering Wheel Load and Temperature Variation. *Materials* 12, 3723 (2019).
  22. Aleksandrov, A., et al.: Ways of application of the provisions of mechanics of bodies with cracks to the calculation of asphalt concrete on strength and plasticity. In: MATEC Web of Conferences 239, 1–8 (2018).
  23. Aleksandrova, N., Chusov, V., Stolbov, Y.: Damage accumulation in asphalt concrete under compression. *Advances in Intelligent Systems and Computing* 982, 908–918 (2020).
  24. Rodezno, M.C., Kaloush, K.: Implementation of asphalt-rubber mixes into the mechanistic empirical pavement design guide. *Road Materials and Pavement Design* 12(2), 423–439 (2011).
  25. Li, Q., et al.: Mechanistic-empirical pavement design guide (MEPDG): a bird's-eye view. *Journal of Modern Transportation* 19(2), 114–133 (2011).
  26. Gercog, V.N., Dolgikh, G.V., Kuzin, N.V.: Calculation criteria for road pavement evenness. Part 1. Substantiating the flatness standards of asphalt pavement. *Magazine of Civil Engineering* 5(57), 45–57 (2015).
  27. Salour, F., Erlingsson, S. Characterisation of Permanent Deformation of Silty Sand Subgrades from Multistage RLT Tests. In: 3rd International Conference on Transportation Geotechnics (ICTG 2016), *Procedia Engineering* 143, 300–307 (2016).
  28. Salour, F., Erlingsson, S.: Permanent deformation characteristics of silty sand subgrades from multistage RLT tests. *International Journal of Pavement Engineering* 18(3), 236–246 (2017).
  29. Rahman, M.S., Erlingsson, S.: Predicting permanent deformation behaviour of unbound granular materials. *International Journal of Pavement Engineering* 16(7), 587–601 (2015).
  30. Chen, X., Chen, L., Zhang, J.: Permanent Deformation Behavior of Coarse-Grained Residual Subsoil Under Large Amplitude Loading Cycles. In: Tutumluer E., Chen X., Xiao Y. (eds) *Advances in Environmental Vibration and Transportation*

Geodynamics. Lecture Notes in Civil Engineering, vol 66. Springer, Singapore (2020).

31. Aleksandrov, A., et al.: The application of the principles of the theory of shakedown to the calculation of pavement layers of granular materials in shear. In: MATEC Web of Conferences 239, 1–8 (2018).
32. Zheng Su, et al.: Characterization of the Undrained Shear Strength of Expansive Soils of High Water Content. In: MATEC Web of Conferences 206, 1–5 (2018).
33. Madjadoubaye, J., Camela, W.R.: Reinforcement of Flexible Pavements by the Use of Geogrid: Case of the Road Mbalmayo - Ebolowa. Civil Engineering Research Journal 8(5), 134-138 (2019).
34. Adams, C.A., Amofa, N.Y., Opoku-Boahen R.: Effect of Geogrid Reinforced Subgrade on Layer Thickness Design of Low Volume Bituminous Sealed Road Pavements. International Refereed Journal of Engineering and Science (IRJES) 3(7), 59-67(2014).
35. Murad Al Qurishee.: Application of Geosynthetics in Pavement Design. International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET) 4(7), 1-7 (2017).
36. Gyulzadyan, H., Voskanyan, G., Ter-Simonyan, V.: Exploration Results of Applying Limestone Powder in Crushed-Stone-Sand Mixtures for Road Pavement Layers. Advanced Materials Research 1020, 31–36 (2014).
37. Naeini, S.A., Naderinia, B., Izadi, E.: Unconfined compressive strength of clayey soils stabilized with waterborne polymer KSCE Journal of Civil Engineering 16(6), 943–949 (2012).
38. Ismaiel, H.A.H.: Cement Kiln Dust Chemical Stabilization of Expansive Soil Exposed at El-Kawther Quarter, Sohag Region, Egypt. International Journal of Geosciences 4, 1416-1424 (2013).
39. Thomas, A., Tripathi, R.K., Yadu, L.K.: A Laboratory Investigation of Soil Stabilization Using Enzyme and Alkali-Activated Ground Granulated Blast-Furnace Slag. Arabian Journal of Geosciences 43, 5193–5202 (2018).
40. Ilin, O.N., Ilin, I.B.: Road organo-mineral mixtures based on oil sludge. Magazine of Civil Engineering 92(8), 115–126 (2019).
41. Dolinsky, Y.A., Starkov, G.B., Matveev, S.A. Experience in Repairing Highways Using Cold Regeneration Technology in the Altai Republic. In: International science and technology conference FarEastCon-2019, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, vol. 753, pp. 1-5. IOP Publishing Ltd (2020).
42. Satyanarayana Reddy C.N.V., Prasad, A.C.S.V.: Performance Studies on Cement Stabilized Gravelly Soil Exposed to Sulfate Environment. Indian Geotechnical Journal 45(2), 217–224 (2014).
43. Rudgalskiy, D., et al.: Strength indices of sand reinforced by foamed bitumen. In: International Scientific Conference Energy Management of Municipal Facilities and Sustainable Energy Technologies EMMFT 2019, Journal of Physics: Conference Series, vol. 1614, pp. 1-9. IOP Publishing Ltd (2020).
44. Vdovin, E.A., Stroganov, V.F.: Properties of cement-bound mixes depending on technological

factors. Magazine of Civil Engineering 93(1), Pp. 147–155 (2020).

45. Steven, B.D. The development and verification of a pavement response and performance model for unbound granular pavements. PhD thesis, in the University of Canterbury. – 2005. – p. 291.
46. Gonzalez, A. An experimental study of the deformational and performance characteristics of foamed bitumen stabilised pavements. PhD thesis, in the University of Canterbury, 2009. 392 p.
47. Пролюгин А. С., Долгих Г. В., Александров А. С. Анализ результатов трехосных испытаний связных грунтов Омской области // Вестник гражданских инженеров. 2021. № 6 (89). С. 140–150.
48. Kruskal, W.H., Wallis W.A.: Use of ranks in one-criterion variance analysis. Journal of the American Statistical Association 47(260), 583–621 (1952)
49. Wilcoxon, F.: Individual Comparisons by Ranking Methods. Biometrics Bulletin 1(6), 80-83 (1945)

## REFERENCES

1. Lunyov A.A., Sirotyuk V.V., Barac N.I. Eksperimental'nye issledovaniya prochnostnykh harakteristik zoloshlakovoy smesi // *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2016, 52(6): 72-79.
2. Lunyov A.A., Sirotyuk V.V., Ivanov E.V. Rezul'taty issledovaniy deformatsionnykh harakteristik zoloshlakovykh smesey // *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2017, 53(1): 103-110.
3. Lunyov A.A., Sirotyuk V.V. Sopotavlenie deformatsionnykh parametrov zoloshlakovoy smesi, poluchennykh v laboratornykh i naturnykh usloviyakh // *Vestnik Tomskogo gosudarstvenno-go arhitekturno-stroitel'nogo universiteta*, 2019, 21(2): 215-227.
4. Lytkin A.A., Starkov G.B., Vagner E.YA. Issledovanie effektivnosti ispol'zovaniya belitovogo shlama dlya ustrojstva monolitnykh sloev dorozhnykh odezhd metodom holodnogo resajklinga // *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2020, 17(6): 764-776.
5. Lytkin A.A. Vliyanie povtornogo uplotneniya i transportnykh nagruzok na harakter tverdeniya belitovogo shlama v sloyakh dorozhnykh odezhd // *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2017, 55(3): 125-132.
6. Lytkin, A.A.: Study of the Transport Loads Influence on the Nature of *Belite Sludge Hardening in Pavement*. *Materials Science Forum* 992, 79–85 (2020).
7. Prolygin A.S., Dolgikh G.V., Kalinin A.L., Alexandrova N.P. Influence of soil moisture on the deformation properties of soil-crushed stone samples during compression. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2021;18(5):614-632. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-5-614-632> (In Russ.)
8. Prolygin A.S., Aleksandrov A.S., Dolgikh G.V., Chusov V.V. Influence of the crushed stone content on the deformation modulus of the soil-crushed

- stone layer. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2021;18(6):772-789. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-6-772-789> (In Russ.)
9. Matveev S.A., Nemirovskij YU.V. Svoystva uprugogo sloya osnovaniya, armirovannogo ob'yomnoj geoshetkoj // *Nauka i tekhnika v dorozhnoj otrasli*, 2005, 33(2): 24-28.
  10. Matveev S.A., Litvinov N.N. Opreделение deformatsionnykh karakteristik shchebenochno-peschanogo osnovaniya, armirovannogo stal'noj geosetkoj // *Vestnik SibADI*, 2013, 32(4): 57-61.
  11. Matveev S.A., Martynov E.A., Litvinov N.N. Eksperimental'no-teoreticheskie issledovaniya armirovannogo osnovaniya dorozhnoj odezhdoy // *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2015, 44(4): 80-86.
  12. Matveev, S.A., et al: The geogrid-reinforced gravel base pavement model. *Magazine of Civil Engineering* 2020, 94(2), 21–30.
  13. Matveev, S.A., Martynov, E.A., Litvinov, N.N.: Determine the reinforcement effect of gravel layer on a sandy foundation. *Applied Mechanics and Materials* 2014, 662: 164-167.
  14. Matveev, S.A., Martynov, E.A., Litvinov, N.N.: Effect of Reinforcing the Base of Pavement with Steel Geogrid *Applied Mechanics and Materials* 2014, 587-589, 1137-1140.
  15. Chusov, V.V., Aleksandrova, N.P., Ignatov, V.F.: Calculation of road clothes by elastic deflection criteria taking into account damage to asphalt concrete. In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 687(2), 1-7 (2019).
  16. Hirakawa, D., et al.: Relationship between sand ground stiffness values from FWD and from plate loading tests. *Japanese Geotechnical Journal* 3(4), 307-320 (2008) (in Japanese).
  17. Kongkitkul, W., et al.: Evaluation of static-equivalent stiffness by a simple falling weight deflectometer. *ATRANS Research* 2(1), 1-14 (2010).
  18. Aleksandrov, A.S., Semenova, T.V., Aleksandrova, N.P.: Calculation of Residual Deformations of Granulated Materials from Exposure to Repeated Loads. *Materials Science Forum* 992, 828–835 (2020).
  19. Churilin, V., Efimenko, S., Matvienko, O., et al.: Simulation of stresses in asphalt-concrete pavement with frost heaving. In: MATEC Web of Conferences 216, 1–9 (2018).
  20. Chen, Y., Chen, X., Bu, J.: Nonlinear damage accumulation of concrete subjected to variable amplitude fatigue loading. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences* 66(2), 157-163 (2018).
  21. Xu, X., New Damage Evolution Law for Steel–Asphalt Concrete Composite Pavement Considering Wheel Load and Temperature Variation. *Materials* 12, 3723 (2019).
  22. Aleksandrov, A., et al.: Ways of application of the provisions of mechanics of bodies with cracks to the calculation of asphalt concrete on strength and plasticity. In: MATEC Web of Conferences 239, 1–8 (2018).
  23. Aleksandrova, N., Chusov, V., Stolbov, Y.: Damage accumulation in asphalt concrete under compression. *Advances in Intelligent Systems and Computing* 982, 908-918 (2020).
  24. Rodezno, M.C., Kaloush, K.: Implementation of asphalt-rubber mixes into the mechanistic empirical pavement design guide. *Road Materials and Pavement Design* 12(2), 423–439 (2011).
  25. Li, Q., et al.: Mechanistic-empirical pavement design guide (MEPDG): a bird's-eye view. *Journal of Modern Transportation* 19(2), 114–133 (2011).
  26. Gercog, V.N., Dolgikh, G.V., Kuzin, N.V.: Calculation criteria for road pavement evenness. Part 1. Substantiating the flatness standards of asphalt pavement. *Magazine of Civil Engineering* 5(57), 45–57 (2015).
  27. Salour, F., Erlingsson, S. Characterisation of Permanent Deformation of Silty Sand Subgrades from Multistage RLT Tests. In: 3rd International Conference on Transportation Geotechnics (ICTG 2016), *Procedia Engineering* 143, 300–307 (2016).
  28. Salour, F., Erlingsson, S.: Permanent deformation characteristics of silty sand subgrades from multistage RLT tests. *International Journal of Pavement Engineering* 18(3), 236-246 (2017).
  29. Rahman, M.S., Erlingsson, S.: Predicting permanent deformation behaviour of unbound granular materials. *International Journal of Pavement Engineering* 16(7), 587–601 (2015).
  30. Chen, X., Chen, L., Zhang, J.: Permanent Deformation Behavior of Coarse-Grained Residual Subsoil Under Large Amplitude Loading Cycles. In: Tutumluer E., Chen X., Xiao Y. (eds) *Advances in Environmental Vibration and Transportation Geodynamics. Lecture Notes in Civil Engineering*, vol 66. Springer, Singapore (2020).
  31. Aleksandrov, A., et al.: The application of the principles of the theory of shakedown to the calculation of pavement layers of granular materials in shear. In: MATEC Web of Conferences 239, 1–8 (2018).
  32. Zheng Su, et al.: Characterization of the Undrained Shear Strength of Expansive Soils of High Water Content. In: MATEC Web of Conferences 206, 1–5 (2018).
  33. Madjadoumbaye, J., Camela, W.R.: Reinforcement of Flexible Pavements by the Use of Geogrid: Case of the Road Mbalmayo - Ebolowa. *Civil Engineering Research Journal* 8(5), 134-138 (2019).
  34. Adams, C.A., Amofa, N.Y., Opoku-Boahen R.: Effect of Geogrid Reinforced Subgrade on Layer Thickness Design of Low Volume Bituminous Sealed Road Pavements. *International Refereed Journal of Engineering and Science (IRJES)* 3(7), 59-67(2014).
  35. Murad Al Qurishee.: Application of Geosynthetics in Pavement Design. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)* 4(7), 1-7 (2017).
  36. Gyulzadyan, H., Voskanyan, G., Ter-Simonyan, V.: Exploration Results of Applying Limestone Powder in Crushed-Stone-Sand Mixtures for Road Pavement Layers. *Advanced Materials Research* 1020, 31–36 (2014).



37. Naeini, S.A., Naderinia, B., Izadi, E.: Unconfined compressive strength of clayey soils stabilized with waterborne polymer KSCE Journal of Civil Engineering 16(6), 943–949 (2012).

38. Ismaiel, H.A.H.: Cement Kiln Dust Chemical Stabilization of Expansive Soil Exposed at El-Kawther Quarter, Sohag Region, Egypt. International Journal of Geosciences 4, 1416-1424 (2013).

39. Thomas, A., Tripathi, R.K., Yadu, L.K.: A Laboratory Investigation of Soil Stabilization Using Enzyme and Alkali-Activated Ground Granulated Blast-Furnace Slag. Arabian Journal of Geosciences 43, 5193–5202 (2018).

40. Ilna, O.N., Ilin, I.B.: Road organo-mineral mixtures based on oil sludge. Magazine of Civil Engineering 2019, 92(8): 115–126.

41. Dolinsky, Y.A., Starkov, G.B., Matveev, S.A. Experience in Repairing Highways Using Cold Regeneration Technology in the Altai Republic. In: International science and technology conference FarEastCon-2019, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 753: 1-5. IOP Publishing Ltd.

42. Satyanarayana Reddy C.N.V., Prasad, A.C.S.V.: Performance Studies on Cement Stabilized Gravelly Soil Exposed to Sulfate Environment. Indian Geotechnical Journal 2014, 45(2): 217–224.

43. Rudgalskiy, D., et al.: Strength indices of sand reinforced by foamed bitumen. In: International Scientific Conference Energy Management of Municipal Facilities and Sustainable Energy Technologies EMMFT 2019, Journal of Physics: Conference Series, 2020, 1614: 1-9. IOP Publishing Ltd.

44. Vdovin, E.A., Stroganov, V.F.: Properties of cement-bound mixes depending on technological factors. Magazine of Civil Engineering 2020, 93(1): 147–155.

45. Steven, B.D. The development and verification of a pavement response and performance model for unbound granular pavements. PhD thesis, in the University of Canterbury, 2005. 291 p.

46. Gonzalez, A. An experimental study of the deformational and performance characteristics of foamed bitumen stabilised pavements. PhD thesis, in the University of Canterbury, 2009. 392 p.

47. Prolygin A. S., Dolgih G. V., Aleksandrov A. S. Analysis of the results of triaxial tests of cohesive soils in the Omsk region. Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers, 2021, 6 (89) :140–150.

48. Kruskal, W.H., Wallis W.A.: Use of ranks in one-criterion variance analysis. Journal of the American Statistical Association 1952, 47(260): 583–621.

49. Wilcoxon, F.: Individual Comparisons by Ranking Methods. *Biometrics Bulletin* 1945, 1(6) : 80-83.

### ВКЛАД СОАВТОРОВ

*Пролыгин А.С. Произвел штамповые испытания, статистическую обработку результатов эксперимента.*

*Калинин А.Л. Произвел разработку методики экспериментального исследования и статистическую обработку результатов эксперимента в части применения критерия W.H. Kruskal, W.A. Wallis.*

*Александров А.С. Написание текста статьи.*

*Александрова Н.П. Постановка задачи, редактирование текста статьи.*

### COAUTHORS ' CONTRIBUTION

*Aleksandr S. Prolygin performed stamp tests, statistical processing of the experiment results.*

*Alexandr L. Kalinin developed the methodology of experimental research and statistical processing of the experimental results in terms of applying W. H. Kruskal, W. A. Wallis criterion.*

*Anatoliy S. Aleksandrov wrote the text of the article.*

*Natalia P. Alexandrova made the statement of the problem, edited the text of the article.*

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Калинин Александр Львович – ст. препод. кафедры «Строительство и эксплуатация дорог».*

*Александров Анатолий Сергеевич – канд. техн. наук, доц. кафедры «Строительство и эксплуатация дорог».*

*Пролыгин Александр Сергеевич – аспирант кафедры «Строительство и эксплуатация дорог».*

*Александрова Наталья Павловна – канд. техн. наук, доц. кафедры «Строительство и эксплуатация дорог».*

### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*Alexandr L. Kalinin – Senior Teacher of the Roads Construction and Operation Department.*

*Anatoliy S. Aleksandrov – Cand. of Sci., Associate Professor of the Roads Construction and Operation Department,*

*Aleksandr S. Prolygin – Postgraduate student, the Roads Construction and Operation Department.*

*Natalia P. Alexandrova – Cand. of Sci., Associate Professor the Roads Construction and Operation Department.*