

## МЕТОДЫ, МОДЕЛИ И ТЕХНОЛОГИИ METHODS, MODELS AND TECHNOLOGIES

УДК 630.3; 624.131.43

DOI: 10.34753/HS.2024.6.1.76

### РАЗРАБОТКА СТЕНДА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТРЕБНОЙ ТОЛЩИНЫ МНОГОСЛОЙНЫХ ДОРОЖНЫХ ОДЕЖД ЛЕСНЫХ ДОРОГ

### DESIGNING OF A STAND FOR DETERMINING THE REQUIRED THICKNESS OF MULTILAYER ROAD COVERINGS OF FOREST ROADS

А.Р. Бирман, О.В. Зубова, С.А. Угрюмов  
ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский  
государственный лесотехнический университет  
имени С.М. Кирова»,  
г. Санкт-Петербург, Россия

[Ok\\_z19@mail.ru](mailto:Ok_z19@mail.ru)

Alexey R. Birman, Oksana V. Zubova,  
Sergey A. Ugryumov  
Saint Petersburg State Forest Technical University,  
St. Petersburg, Russia

[Ok\\_z19@mail.ru](mailto:Ok_z19@mail.ru)

**Аннотация.** Основными механическими характеристиками, определяющими эксплуатационные показатели лесной дороги, являются модуль деформации, характеризующий жесткость грунта в основании и его сопротивляемость деформации, а также модуль упругости, характеризующий как деформационные, так и прочностные свойства грунтов. Одним из главных параметров, определяющих величины указанных модулей, является величина деформации грунта, передаваемая через толщу дорожной одежды. Применяемые в настоящее время методики расчета нежестких дорожных одежд, как аналитические, так и экспериментальные, являются достаточно сложными и не обладают должной достоверностью. Особенно высока погрешность при конструировании многослойных дорожных одежд (три слоя и более). Авторами предлагается конструкция стенда для наблюдения упругих и остаточных деформаций при динамическом нагружении многослойных дорожных конструкций с возможностью определения потребной толщины каждого слоя экспериментальным путем так, чтобы на грунт земляного полотна передавался только равномерно распределенный вес вышележащих слоев. Предлагаемый стенд позволяет визуально определять величины деформации (осадки) каждого слоя под нагрузкой

**Abstract.** The main mechanical characteristics that determine the operational performance of forest road are the modulus of deformation, which characterizes the stiffness of the soil at the base and its resistance to deformation, as well as the modulus of elasticity, which characterizes both the deformation and the strength of the soil. One of the main parameters determining the values of these modules is the amount of soil deformation transmitted through the thickness of the pavement. Currently used methods for calculating non-rigid road structures, both analytical and experimental, are quite complex and do not have the required reliability. The error is especially high when designing multilayer road structures (three layers or more). The authors propose a stand design for observing elastic and residual deformations under dynamic loading of multilayer road structures with the possibility of determining the required thickness of each layer experimentally so that only the evenly distributed weight of the upper layers is transmitted to the ground of the roadbed. The proposed stand allows for the visual determination the values of deformation (precipitation) of each layer under load and after removing the load, as well as experimentally determine the real values of the deformation modules of both each layer of the road structure and the underlying soil of the roadbed. The stand makes it possible to determine the discrete degree of deformation of each layer of the road structure and the underlying soil. That allows, based

Birman A.R., Zubova O.V., Ugryumov S.A. Designing of a stand for determining the required thickness of multilayer road coverings of forest roads. *Hydrosphere. Hazard processes and phenomena*, 2024, vol. 6, iss. 1, pp. 76–82. (In Russian; abstract in English). DOI: 10.34753/HS.2024.6.1.76.

и после снятия нагрузки, а также экспериментально определять реальные величины модулей деформации как каждого слоя дорожной одежды, так и подстилающего грунта земляного полотна. Стенд дает возможность определения дискретной величины осадки каждого слоя дорожной одежды и подстилающего грунта, что позволяет по результатам испытаний оценить эффективность сопротивления деформациям в каждом слое и варьировать толщины и виды материалов каждого слоя таким образом, чтобы каждый из них обеспечивал наибольшее сопротивление внешней нагрузке. С использованием стенда можно проводить теоретические исследования по взаимодействию различных материалов в толще дорожной одежды, возможностям их восстановления при снятии нагрузки, распределению деформаций за пределами отпечатка колеса. Применение данного стенда расширяет потенциал для изучения конструкций лесных дорог, что позволяет экономить дорожно-строительные материалы и повысить эффективность строительства лесных дорог.

**Ключевые слова:** лесные дороги; многослойная дорожная одежда; модуль общей деформации; стенд для определения потребной толщины дорожной одежды.

### Введение

При проектировании дорожных одежд переходного типа, особенно актуальных на лесных и лесохозяйственных дорогах, необходимо добиваться таких условий, при которых величины механических характеристик подстилающих грунтов земляного полотна не превышают допустимых значений. Основными механическими характеристиками, определяющими эксплуатационные показатели лесной дороги, являются модуль деформации, характеризующий жесткость грунта в основании и его сопротивляемость деформации, а также модуль упругости, характеризующий как деформационные, так и прочностные свойства грунтов. Корректное определение этих величин позволяет при устройстве дорожной одежды

on the test results, to evaluate the effectiveness of deformation resistance in each layer and vary the thicknesses and types of materials of each layer so that each of them provides the greatest resistance to external load. Using the stand, theoretical studies can be carried out on the interaction of various materials in the composition of the road structure, the possibilities of their restoration when removing the load, and the distribution of deformations beyond the wheel imprint. The use of this stand expands the potential for studying the structures of forest roads, which allows to save road construction materials and to increase the efficiency of forest road construction.

**Keywords:** forest roads; multilayer road structure; general deformation module; stand for determining the required thickness of the road structure.

наиболее полно использовать несущую способность подстилающего грунта, устанавливать рациональную и экономичную толщину дорожной одежды, а также обеспечивать устойчивость откосов земляного полотна [Ибрахим, 2016].

Одним из главных параметров, определяющих величины указанных модулей, является величина деформации грунта (осадки), передаваемая через толщу дорожной одежды. Нами полагается, что эти деформации должны сводиться к минимуму, а вид нагрузки, передаваемой на подстилающий грунт земляного полотна, должен быть максимально приближен к виду равномерно распределенной нагрузки, величина которой определяется только весом вышележащих слоев дорожной одежды.

Аналитические расчеты параметров выполнения такого условия достаточно сложны, так как физико-механические свойства многослойной дорожной одежды меняются в зависимости от вида используемого материала для каждого слоя одежды, его влажности, сил внутреннего трения и сцепления, других показателей. Известные эмпирические исследования, как лабораторные, так и полевые также трудоемки, а их результаты не отличаются требуемой точностью. Нормативные документы подразумевают испытание на вдавливание штампа только для полевых условий (ГОСТ 20276.1-2020<sup>1</sup>) Лабораторные испытания грунтов предусматривают испытания на одноосное сжатие (ГОСТ 12248.2-2020<sup>2</sup>) или компрессионное сжатие (ГОСТ 12248.3-2020<sup>3</sup>), которое согласно данным И.И. Черкасова [Черкасов, 1976] не отражает распределения нагрузки в стороны от штампа. При этом, согласно данным И.И. Черкасова остаточные деформации при вдавливании штампа и при компрессионном сжатии характеризуются совершенно различными кривыми. В работе [Виноградов, 2022] кроме того отмечается, что модуль деформации некорректно рассматривать в виде фиксированного значения, т.к. для сложных дисперсных грунтовых систем модуль деформации – это функция давления, к тому же нелинейная. Следует отметить, что все испытания по определению модуля общей деформации производятся для одного слоя однородного грунта, при этом существующие методики (например, ОДМ 218.5.007-2016<sup>4</sup>) учитывают наличие как упругих, так и остаточных деформаций. Однако восстановление упругих деформаций в нижних слоях дорожной одежды и

в подстилающем грунте земляного полотна будет проходить не так, как при испытаниях в связи с тем, что восстановлению будет мешать вес вышележащих слоев. Таким образом многослойность конструкции накладывает дополнительные сложности на определение несущей способности оснований.

В работе [Ибрагим, 2016] предлагается в качестве одного из методов расчета моделирование дороги как композитного материала, что не учитывает неравномерности свойств слоев дорожной одежды, варьирования их толщины, неравномерности увлажнения, промерзания и т.д. Анализ методов определения упругих и остаточных деформаций, представленный [Ибрагим, 2016] также показывает, что все используемые в действующих документах методы расчета нежестких дорожных одежд являются приближенными, основанными на введении упрощающих положений и допущений, что может приводить как к занижению, так и к завышению толщины слоев дорожных одежд, в том и другом случае влекущем повышение экономических затрат.

По данным [Горский, 2021] в настоящее время происходит попытка перехода от традиционной и долгое время используемой упрощенной методики расчета нежестких дорожных одежд с приведением многослойных конструкций к двухслойным. При разработке ОДМ 218.3.1.005-2021<sup>5</sup> был проведен анализ как зарубежного опыта расчетов, так и исследования А.К. Приварникова и К.К. Туроверова, позволяющие выполнять расчеты для многослойных оснований. Авторами было выявлено значительное расхождение между расчетами толщины дорожной одежды по

<sup>1</sup> ГОСТ 20276.1-2020. Межгосударственный стандарт. Грунты. Метод испытания штампом [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200174754>.

<sup>2</sup> ГОСТ 12248.2-2020. Межгосударственный стандарт Грунты. Определение характеристик прочности методом одноосного сжатия [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/566409063>.

<sup>3</sup> ГОСТ 12248.3-2020. Межгосударственный стандарт. Грунты. Определение характеристик прочности и деформируемости методом трехосного сжатия [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/566409062>.

<sup>4</sup> ОДМ 218.5.007-2016 Методические рекомендации по определению модуля упругости статическим штампом / Отраслевой дорожный методический документ [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/456010072>.

<sup>5</sup> ОДМ 218.3.1.005-2021 Проектирование нежестких дорожных одежд. Методические рекомендации по расчету параметров напряженно-деформированного состояния многослойных конструкций при воздействии колесных нагрузок [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/573741138>.

упрощенным методикам и по математическим моделям для многослойных полупространств. Погрешности составили до 99 %, а при различных углах внутреннего трения и более 100 %. Несмотря на то, что результаты данного исследования привели к разработке и внедрению новых нормативных документов, таких как ОДМ 218.3.1.005-2021<sup>5</sup> и ПНСТ 542-2021<sup>6</sup>, не приведены экспериментальные подтверждения достоверности результатов расчетов по предлагаемым методикам, однако даже на теоретическом этапе закономерности распределения упругих и остаточных деформаций в многослойных конструкциях обоснованы не в полной мере.

В связи с многообразием и недостаточным обоснованием расчетов модуля общей деформации, а также его упругой и остаточной составляющих, авторам видится необходимость более глубокого изучения процессов, происходящих в многослойных дорожных одеждах под действием динамических нагрузок.

### Материалы и методы

Для испытаний рассматриваются грунты различного гранулометрического состава, песок средней крупности, песчано-гравийные, щебеночно-песчаные смеси оптимального и неоптимального состава.

Испытания в разрабатываемом приборе предлагается выполнять, адаптируя методику ГОСТ 20276.1-2020 «Грунт. Метод испытания штампом»<sup>1</sup> к лабораторным условиям.

### Результаты исследования

К использованию предлагается стенд для экспериментального определения потребной толщины многослойной дорожной одежды, выполненной, например, из трех слоев: покрытия из щебня, гравийно-песчаного основания, песчаного подстилающего слоя (рисунок 1).

Предлагаемый стенд позволит визуально определять величины деформации (осадки) каждого слоя под нагрузкой и после снятия

нагрузки, а значит, и экспериментально определять реальные величины модулей деформации как каждого слоя дорожной одежды, так и подстилающего грунта земляного полотна. Визуальная оценка восстановления упругой деформации каждого слоя поможет сравнить фактическое значение упругости грунта и материала с учетом нагрузки от вышележащих слоев с табличными и расчетно-определяемыми величинами.

Схема предлагаемого стенда изображена на рисунке 1.

Стенд включает: рычажные весы (на рисунке 1 условно не показаны), на рабочем плече которых закреплен штамп (1) в виде пластины, выполненной из половины круга диаметром  $D$  и передающей усилие  $F$ ; емкость (2) в виде вертикального стального корпуса, выполненного из трубы с внутренним диаметром  $3D$ , разрезанной по плоскости, проходящей через диаметры торцов трубы; образец (3). Емкость (2) имеет перфорированное дно (4) и снабжена вертикальной прозрачной пластиной (5), имеющей высоту емкости и жестко скрепленную с дном емкости и ее вертикальными кромками. Пластина (5) имеет вертикальную метрическую шкалу (6). На дне емкости (2) установлена металлическая сетка для защиты перфорированного дна от засорения (7).

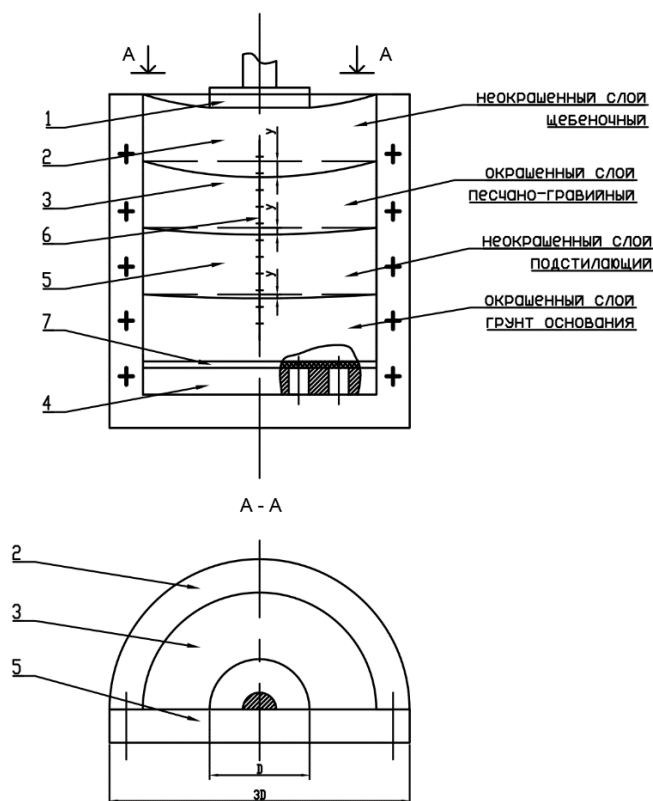
Перед проведением экспериментов образец формируют из последовательно уложенных слоев дорожной одежды и подстилающего грунта земляного полотна. При этом материал среднего слоя трехслойной дорожной одежды и материал слоя подстилающего грунта предварительно окрашивают красителем, резко отличающимся по цвету от материала неокрашенных слоев. Толщины каждого слоя могут быть выбраны в соответствии с рекомендациями СП 288.1325800.2016<sup>7</sup>.

Подготовка образца (3) перед его размещением в емкости заключается в его уплотнении на приборе стандартного уплотнения

<sup>6</sup> ПНСТ 542-2021 Дороги автомобильные общего пользования. Нежесткие дорожные одежды. Правила проектирования (с Поправками) / ПНСТ № 542-2021 [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200179561>.

<sup>7</sup> СП 288.1325800.2016 «Дороги лесные. Правила проектирования и строительства» [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/456069592>.

при оптимальной влажности. Затем образец помещают в емкость (2) и ставят в эксикатор для капиллярного водонасыщения в соответствии с ГОСТ 30416-2020<sup>8</sup>.



**Рисунок 1.** Схема станда для

экспериментального определения толщины слоев дорожной одежды. 1 – штамп для передачи вертикальных нагрузок, 2 – стальной корпус с внутренним диаметром  $3D$ , 3 – образец многослойной дорожной одежды, 4 – перфорированное дно корпуса, 5 – вертикальная прозрачная пластина, 6 – вертикальная метрическая шкала, 7 – металлическая сетка

**Figure 1.** The scheme of the stand for the experimental determination of the thickness of the layers of pavement. 1 – stamp for transmitting vertical loads, 2 – steel case with an internal diameter of  $3D$ , 3 – sample of multilayer pavement, 4 – perforated bottom of the case, 5 – vertical transparent plate, 6 – vertical metric scale, 7 – metal mesh

Подготовленную емкость с образцом подвергают нагрузке через штамп, увеличивая нагрузку ступенями по  $5\text{--}10\text{ Н/см}^2$ , начиная с  $5\text{ Н/см}^2$ . Каждую ступень выдерживают до полного прекращения осадки штампа. Величину деформации каждого слоя  $y$  (см. рисунок 1) дорожной одежды и подстилающего грунта земляного полотна измеряют по показаниям на вертикальной метрической шкале (6).

При деформации слоев дорожной одежды частицы материала верхних слоев образца вдавливаются в частицы нижних слоев, и величины  $y$  и  $l_y$  для каждого слоя можно определять по показаниям вертикальной шкалы 6. При этом нижние границы разноокрашенных частиц каждого слоя показывают распределение вертикальной деформации материала под нагрузкой от минимальных до максимальных величин.

Наиболее значимая величина для расчетов по методу упругого прогиба – модуль общей деформации грунта  $E_{деф}$  – это соотношение между сжимающим напряжением грунта и относительной полной деформацией, которую оно вызывает. Выражается показатель в МПа и определяется из расчета усадки и нагрузки на дорожное полотно по формуле

$$E_{деф} = \frac{\pi}{4} * \frac{\sigma * D * (1 - \nu^2)}{l_{общ}} \quad (1)$$

где  $D$  – расчетный диаметр отпечатка колеса, м;

$\sigma$  – вертикальное давление на штамп, МПа;

$l_{общ}$  – полная осадка штампа, м;

$\nu$  – коэффициент Пуассона;

$\frac{\pi}{4}$  – поправочный коэффициент при испытании круглым жестким штампом.

Если задаваться допустимыми значениями  $E_{деф}$ , то искомой величиной в формуле (1) является  $l_{общ}$ , которую и важно определить при стендовых испытаниях.

Следует отметить, что в указанной расчетной формуле с применением штампа получают суммарную величину осадки штампа, как сумму деформаций всех слоев дорожной одежды, что, как было указано выше является существенным недостатком, приводящим к

<sup>8</sup> ГОСТ 30416-2020. Грунты. Лабораторные испытания. Общие положения [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200180503>.

погрешностям расчета дорожных одежд и удорожанию конструкции. Предлагаемый стенд отличается тем, что дает возможность определения дискретной величины осадки каждого слоя дорожной одежды и подстилающего грунта, что позволяет по результатам испытаний давать оценку эффективности сопротивления деформациям в каждом слое и варьировать толщины и виды материалов каждого слоя таким образом, чтобы каждый из них обеспечивал наибольшее сопротивление внешней нагрузке.

То есть, переписав формулу (1) в виде

$$l_{\text{общ}} = \frac{\pi}{4} * \frac{\sigma * D * (1 - \nu^2)}{[E_{\text{деф}}]} \quad (2)$$

где  $E_{\text{деф}}$  – допускаемое значение модуля общей деформации, на основании которого можно сделать заключение о работоспособности исследуемого дорожного покрытия и, при необходимости, менять толщины слоев или виды материалов для их формирования.

Пользуясь результатами измерения осадки каждого слоя дорожной одежды можно достаточно точно построить кривую осадки штампа в зависимости от явлений, происходящих в каждом слое дорожной одежды при силовом воздействии штампа.

Конфигурация пограничной кривой является важной информативной характеристикой, определяющей распределение напряжений (давлений) в каждом слое, а величина максимальной стрелы прогиба пограничной кривой позволяет определять модули деформации и упругости слоев образца внутри дорожной одежды, что дает возможность рационально выбрать толщины материалов, используемых для формирования дорожной одежды. Экспериментально полученная кривая изменения напряжений в слоях дорожной одежды может определить вид расчетной модели (Винклера, Фусса и т.д.), выбранной для аналитической оценки деформационных явлений в материалах дорожной одежды и подстилающих грунтов.

Следует отметить, что при испытаниях можно произвести замену плоского штампа на штамп с рабочей поверхностью, повторяющей контактную поверхность определенных колес лесовозного транспорта. В этом случае четко обозначатся деформированные границы слоев дорожной одежды, что позволит оценить направления распределения частиц материала слоя под воздействием колеса.

При заполнении емкости (2) только подготовленным к испытаниям конкретным материалом слоя дорожной одежды или подстилающего грунта можно определять модули деформации и упругости для исследуемого материала грунта.

Кроме вышерассмотренного примера исследования трехслойной дорожной одежды на стенде можно исследовать конструкцию покрытия из любого количества слоев, формируя исследуемый образец из чередующихся окрашенных и неокрашенных частиц материала каждого слоя.

### Заключение

Предлагаемый стенд для определения необходимой толщины многослойной дорожной одежды может быть применен не только для сугубо практических целей лесного дорожного строительства. Проведение серий экспериментов с различными комбинациями материалов и грунтов, а также варьирование условий (в том числе, изменение влажности и плотности слоев) может принести существенный вклад в теоретические исследования механических свойств грунтов и дорожно-строительных материалов. Возможность непосредственного наблюдения за упругими и остаточными деформациями в многослойной дорожной одежде при динамических нагрузках позволит подтвердить или уточнить существующие расчетные методики определения модуля общей деформации и тем самым усовершенствовать методики расчета нежестких дорожных одежд.

**Литература**

Ибрахим Р.А. Анализ методов расчета деформаций нежестких дорожных одежд // Молодой ученый. 2016. № 30 (134). С. 75–83.

Черкасов И.И. Механические свойства грунтов в дорожном строительстве. М.: Транспорт, 1976. 247 с.

Виноградов А.Ю., Каширский В.И., Лободенко И.Ю., Зубова О.В., Виноградов И.А., Парфенов Е.А., Кучмин А.В., Обызов В.А., Платонов А.П. Модуль деформации как основная характеристика деформационной способности грунтов при проектировании сооружений лесного комплекса // Гидросфера. Опасные процессы и явления. 2022. Т. 4. Вып. 1. С. 52–67.

**References**

Ibrahim R.A. Analiz metodov rascheta deformacij nezhestkih dorozhnyh odezhd [Analysis of methods for calculating deformations of non-rigid road clothes] *Molodoj uchenyj*, 2016, vol 30 (134), pp. 75–83. (In Russian)

Cherkasov I.I. *Mekhanicheskie svojstva gruntov v dorozhnom stroitel'stve* [Mechanical properties of soils in road construction]. М.: Transport, 1976, 247 p. (In Russian).

Vinogradov A.Yu., Kashirskij V.I., Lobodenko I.Yu., Zubova O.V., Vinogradov I.A., Parfenov E.A., Kuchmin A.V., Obyazov V.A., Platonov A.P. Modul' deformacii kak osnovnaya harakteristika deformacionnoj sposobnosti gruntov pri proektirovanii sooruzhenij lesnogo kompleksa [The modulus of deformation as the main characteristic of the deformation ability of soils in the design of structures of the forest complex] *Hydrosphere. Hazard processes and phenomena*, 2022, vol. 4, iss. 1., pp. 52–67. (In Russian).