

УДК 625.71

**А. С. Александров, А. Л. Калинин, Т. В. Семенова**

*Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)*

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРВОЙ КРИТИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ ДЛЯ ДОРОЖНЫХ КОНСТРУКЦИЙ**

Показано, что расчет дорожных одежд по сдвигу в грунте земляного полотна является аналогом расчета по допускаемым давлениям. Причем если величину допускаемого давления вычислять из условия пластичности Мора — Кулона, то расчет сводится к проверке условия, согласно которому давление не должно превышать первую критическую нагрузку. Преимущество расчета по безопасным давлениям состоит в возможности определения первой критической нагрузки по данным эксперимента, а измерить напряжение сдвига на площадке скольжения, проведенной через наиболее опасную точку, невозможно. Разработана методика определения первой критической нагрузки, учитывающая различия в напряженно-деформированном состоянии земляного полотна и слоев дорожной одежды при воздействии на них нагрузок от жесткого и гибкого штампов. Приведены результаты эксперимента и данные их статистической обработки.

**Ключевые слова:** дорожная одежда, сопротивление сдвигу, первая критическая нагрузка, критерий Мора — Кулона с тремя параметрами.

### **Введение**

Разработка метода расчета дорожных одежд нежесткого типа является одной из основных проблем дорожной отрасли. В настоящее время решаются задачи компьютерной автоматизации нормативных методов расчета [1—6]. Выполняется анализ нормативных критериев расчета [7, 8], на основе которого предпринимаются попытки их модификации и разработки новых методов расчета дорожной одежды [9—12], соответствующих современным условиям работы дорожных одежд и материалов их покрытий [13—15]. В нашей работе рассмотрим проблему расчета дорожных одежд нежесткого типа по сопротивлению сдвигу и предпримем попытку разработки экспериментальной методики определения первой критической нагрузки. Демонстрируя актуальность этой темы, выполним анализ методов расчета дорожных одежд, регламентируемых ПНСТ 265-2018, ПНСТ 371-2019 и ПНСТ 542-2021.

Первое решение задачи расчета дорожной одежды нежесткого типа дано Н. Н. Ивановым и его учениками, оно используется в виде одного из критериев проектирования дорожных одежд для дорог с низкой интенсивностью движения в ПНСТ 371-2019. Методика расчета дорожных одежд по ПНСТ 371-2019 не содержит расчета по сопротивлению сдвигу в грунте земляного полотна. По нашему мнению, это большое упущение данного стандарта РФ. Суть нашего замечания сводится к тому, что основная расчетная формула ПНСТ 371-2019, применяемая для вычисления общего модуля деформации двухслойной системы, выведена из линейной зависимости общей (упругопластической) осадки двухслойной системы от напряжения, причем только вертикального нормального напряжения. Аналогичное замечание касается расчета дорожной одежды по глубине колеи. И в этом расчете методика ПНСТ 371-2019 исходит из допущения линейной зависимости остаточной

деформации от давления. Согласно основам механики грунтов, заложенным Н. М. Герсевановым, сопротивление грунтового основания нагрузке характеризуется двумя критическими нагрузками. Первая критическая нагрузка разделяет две фазы деформирования основания: фазу уплотнения и фазу сдвигов. В фазе уплотнения осадка связана с давлением линейной зависимостью. Поэтому в этой фазе справедливо применять формулы ПНСТ 371-2019. В фазе сдвигов осадка и давление связаны нелинейной зависимостью. В этой стадии работы грунтового основания линейные зависимости ПНСТ 371-2019 дают заниженные остаточные деформации и завышенный модуль общей деформации. Поэтому при работе грунтового основания в фазе сдвигов формулы ПНСТ 371-2019 неприменимы.

Методы расчета дорожных одежд для дорог общего пользования содержат расчет по сопротивлению сдвигу. В практике нормативных документов России применялось две методики, которые имеют общие подходы и принципиальные различия. Общим элементом обоих расчетов является использование критерия Мора — Кулона. В этих расчетах полное напряжение сдвига определяется по принципу независимости действия сил, т. е. суммированием эквивалентных напряжений условия пластичности Мора — Кулона. Критерий запишем в виде, предложенном А. М. Кривисским:

$$\tau_{\sigma} + \tau_{\gamma} \leq k \cdot c, \quad (1)$$

где  $\tau_{\sigma}$  и  $\tau_{\gamma}$  — активные напряжения сдвига, от временной нагрузки и веса слоев, расположенных выше рассчитываемого конструктивного элемента, вычисляемые как эквивалентное напряжение критерия Мора — Кулона, МПа;  $k$  — коэффициент, учитывающий условия работы грунта в дорожной конструкции, который в ранее действовавших нормативных документах представлен в виде функции трех и более коэффициентов, а в настоящих стандартах это известный коэффициент  $k_d$ ;  $c$  — сцепление, МПа.

Активные напряжения сдвига вычисляются как эквивалентные напряжения критерия Мора — Кулона, т. е. по формулам

$$\tau_{\sigma} = \frac{\sigma_{1N} - \sigma_{3N}}{2 \cdot \cos \varphi} - \frac{\sigma_{1N} + \sigma_{3N}}{2} \operatorname{tg} \varphi; \quad \tau_{\gamma} = \frac{\sigma_{1\gamma} - \sigma_{3\gamma}}{2 \cdot \cos \varphi} - \frac{\sigma_{1\gamma} + \sigma_{3\gamma}}{2} \operatorname{tg} \varphi, \quad (2)$$

где  $\sigma_{1N}$  и  $\sigma_{3N}$  — максимальное и минимальное главные напряжения от временной нагрузки соответственно, МПа;  $\sigma_{1\gamma}$  и  $\sigma_{3\gamma}$  — максимальное и минимальное главные напряжения от веса слоев соответственно, расположенных выше рассчитываемого элемента, МПа;  $\varphi$  — угол внутреннего трения, радиан.

Из анализа критерия (1) и формул (2) следует, что предельное состояние наступает тогда, когда в наиболее опасной точке конструкции возникает предельное состояние по критерию Мора — Кулона. Это возможно только тогда, когда давление, передаваемое вышележащими слоями на рассчитываемый конструктивный элемент, равно первой критической нагрузке.

Подход ранее действовавших документов ВСН 46-72, ВСН 46-83 и ОДН 218.046-01 и современного стандарта ПНСТ 265-2018 к расчету активного напряжения сдвига от временной нагрузки одинаков. Это напряжение вычисляется по одной и той же номограмме. Но в ранее действовавших

нормах ВСН 46-72 и ВСН 46-83 при расчете напряжений сдвига от временной нагрузки и собственного веса материалов применялось одно и то же значение угла внутреннего трения. В современных расчетах по ОДН 218.046-01, ПНСТ 265-2018 и ПНСТ 542-2021 значение угла внутреннего трения разное.

Оперирование разными значениями угла внутреннего трения при расчете составляющих полного напряжения сдвига обсуждалось в нашей работе [16]. Суть этого обсуждения сводится к ошибочности введения разных значений угла внутреннего трения. Дело в том, что для критерия Мора — Кулона углы наклона наиболее опасной площадки к главным осям рассчитываются по классическим формулам [17—19]. Если под обозначением  $\alpha_1$  понимать угол наклона площадки скольжения к главной площадке, перпендикулярно которой действует максимальное главное напряжение  $\sigma_1$ , то этот угол найдем по формуле

$$\alpha_1 = \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}. \quad (3)$$

Аналогично, обозначив  $\alpha_3$  угол наклона площадки скольжения к главной площадке, перпендикулярно которой действует минимальное главное напряжение  $\sigma_3$ , этот угол найдем по формуле

$$\alpha_3 = \frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}. \quad (4)$$

Безусловно, что применение принципа суперпозиции силы, записанного суммой в неравенстве (1), требует, чтобы оба активных напряжения сдвига, вычисляемые по формулам (2), действовали относительно одной и той же площадки. Это возможно лишь в том случае, если в обеих формулах (2) угол внутреннего трения одинаков. Следовательно, решение ленинградской научной школы верное, а решение, данное разработчиками современных стандартов, ошибочное.

Кроме того, в решениях ранее действовавших документов при расчете активных напряжений сдвига от веса слоев, расположенных над рассчитываемым элементом, использовалась гипотеза А. Динника, а в современных решениях применяется гипотеза А. Гейма.

Гипотеза А. Динника состоит в том, что горизонтальное нормальное напряжение можно определить произведением коэффициента бокового давления и нормального вертикального напряжения. В точках, расположенных на оси симметрии нагрузки, направление главных осей и осей декартовой системы совпадают. Поэтому в этих точках нормальное вертикальное напряжение является максимальным главным напряжением, а нормальное горизонтальное напряжение — это минимальное главное напряжение. Конечно же, величину нормального вертикального напряжения от собственного веса определяют произведением объемного веса на расстояние от поверхности до расчетной точки. В этом случае гипотеза А. Динника записывается формулами

$$\sigma_{1\gamma} = \gamma_{\text{ср}} \cdot h; \quad \sigma_{1\gamma} = \sigma_{3\gamma} = \xi \cdot \gamma_{\text{ср}} \cdot h, \quad (5)$$

где  $\gamma_{\text{ср}}$  — вес дорожной одежды, МН/м<sup>3</sup>;  $h$  — толщина дорожной одежды, м;  $\xi$  — коэффициент бокового давления или коэффициент Динника.

Заметим, что максимальная величина коэффициента Пуассона составляет 0,5. В этом случае коэффициент бокового давления принимает значение, равное единице, а максимальное и минимальное главные напряжения от веса грунта становятся равными друг другу. То есть гипотеза А. Динника становится гипотезой А. Гейма, а формулы (5) приобретают вид

$$\sigma_{1\gamma} = \sigma_{3\gamma} = \gamma_{\text{ср}} \cdot h. \quad (6)$$

Подстановка формул (5) в зависимости (2) приведет к решению А. М. Кривисского и его последующих модификаций в ВСН 46-72 и ВСН 46-83. Подстановка формул (6) в зависимости (2) и далее в неравенство (1) приведет к решению, регламентированному ОДН 218.046-01, ПНСТ 265-2018 и ПНСТ 542-2021.

Показав отличия в нормативных расчетах разных лет, отметим острую необходимость в разработке альтернативных методик этого расчета. Такое решение можно выполнить как в напряжениях сдвига, так и в давлениях, сравнивая их с первой критической нагрузкой. Отметим важное преимущество решения в давлениях: оно состоит в том, что давление можно вычислить, зная величину нагрузки и площадь штампа. Расчет по напряжениям сдвига таким достоинством не обладает. Напряжение сдвига в критерии Мора — Кулона зависит от двух главных напряжений, измерение которых на двух взаимно перпендикулярных площадках невозможно.

В связи с этим методика определения первой критической нагрузки для дорожной отрасли приобретает острую необходимость.

#### **Методы и материалы**

В практике испытаний грунтов широкое применение нашли штамповые испытания. Они имитируют воздействие реальных нагрузок на грунтовые основания и конструкции дорожных одежд. Форма эпюр и величина контактных давлений зависят от ряда факторов: гибкости штампа, вида грунта основания, величины нагрузки на штамп и др. Поэтому такие факторы нуждаются в учете и рассмотрении в процессе разработки методики определения первой критической нагрузки. На рис. 1 приведены эпюры контактных давлений между слоями дорожной конструкции и от штампов на основании.

Эпюры контактных давлений, передаваемых конструктивными слоями жесткой дорожной одежды, показаны на рис. 1, а [20, 21, 25]. Суть традиционных представлений состоит в том, что эпюра контактных давлений покрытия с основанием имеет колоколообразный вид. Наибольшее давление имеет место в точке, расположенной на оси симметрии нагрузки на поверхности основания. С увеличением глубины эпюра контактного давления выравнивается, приближаясь к равномерно распределенной нагрузке, что показано на рис. 1, а. По мере увеличения глубины, характеризующей положение поверхности слоя, величина давления уменьшается, а площадь его распределения, наоборот, увеличивается. Рассматривая точки, расположенные на оси симметрии нагрузки на поверхности дополнительного слоя основания и земляного полотна, можно принять допущение, что они воспринимают равномерно распределенную нагрузку. Это допущение лежит в основе нормативных методов расчета. В слоях из зернистых материалов и грунтах возникает трехосное сжатие, характеризующееся тремя главными напряжениями, имеющими в любой точке слоя или грунтового полупространства одинаковый

знак. Следовательно, главные напряжения всегда сжимающие. В любой точке имеются опасные площадки, по которым происходит сдвиг. Эти площадки повернуты к главным площадкам под углами  $\alpha_1$  и  $\alpha_3$ , как показано на рис. 1, б. Вдоль этих площадок действует касательное напряжение  $\tau$ , а перпендикулярно к ним нормальное  $\sigma$ , которые приведены на рис. 1, б. Если в основу расчета положить условие пластичности Мора — Кулона, то значения углов  $\alpha_1$  и  $\alpha_3$  вычисляются по формулам (3) и (4). Касательное и нормальное напряжения ( $\tau$  и  $\sigma$ ) на площадках сдвига рассчитываются как уменьшаемое и вычитаемое эквивалентного напряжения по критерию Мора — Кулона (2). По мере удаления от оси симметрии нагрузки в каждой точке происходит поворот главных осей и поворот площадок сдвига, что обуславливает формирование линий скольжения. Испытания дорожных одежд и грунтов земляного полотна выполняют при помощи штамповых установок и колесом автомобиля. Известно, что эпюры контактных давлений, передаваемых штампом, зависят от ряда факторов. Например, на форму эпюры контактных давлений влияет показатель гибкости штампа или фундамента. Этот параметр принято определять по формуле М. И. Горбунова-Посадова, она имеет вид

$$t \approx 10 \frac{E_{soil} \cdot l^3}{E_f \cdot h^3}, \quad (7)$$

где  $E_{soil}$  и  $E_f$  — модули деформации грунта и материала фундамента (штампа);  $l$  и  $h$  — длина и высота фундамента (штампа) соответственно.

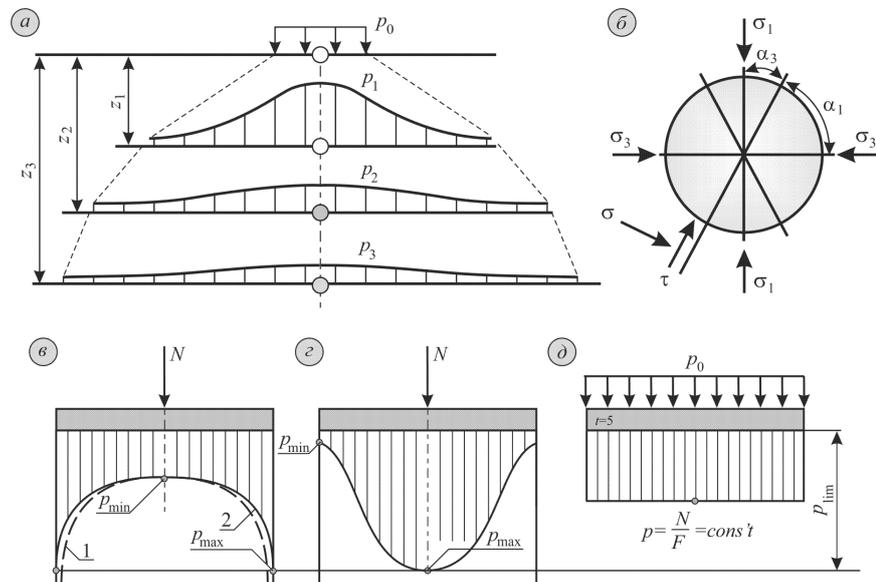


Рис. 1. Эпюры контактных давлений [20—24]: а — контактные давления между слоями дорожной одежды; б — схема напряженного состояния и формирования площадок сдвига в точке, принадлежащей оси симметрии нагрузки; в — контактные давления жесткого штампа, воспринимающего сосредоточенную нагрузку: 1 — теоретическая эпюра, соответствующая решению Ж. Буссинеска, для абсолютно жесткого штампа; 2 — экспериментальная эпюра; г — контактные давления гибкого штампа, воспринимающего сосредоточенную нагрузку; д — контактные давления гибкого штампа, воспринимающего равномерно распределенную нагрузку

Эпюры контактных давлений, показанные на рис. 1, в [22—24], характерны для абсолютно жесткого штампа, характеризующегося показателем гибкости  $t = 0$ . На этом рисунке приведены две эпюры. Первая эпюра, обозначенная цифрой 1, вытекает из решения Ж. Буссинеска, согласно которому контактное давление под краем штампа стремится к бесконечности, но оно уменьшается от краев к центру. Под центром круглого жесткого штампа контактное давление равно половине среднего давления. В действительности основания не способны принимать бесконечно большие давления. Поэтому на практике при увеличении нагрузки на жесткий штамп давления под его краями возрастают, но до тех пор, пока не достигнут некоторого предельного значения, обозначенного на рис. 1, в,  $z$  и  $d$ ,  $p_{lim}$ . На рис. 1, в такая эпюра обозначена цифрой 2. При достижении давлением величины  $p_{lim}$ , его дальнейшего увеличения не происходит. В точках основания с такими контактными давлениями предельное состояние достигнуто. Поэтому величина давления, обозначенная на рис. 1, в,  $z$  и  $d$  как  $p_{lim}$ , есть предельная величина нагрузки, при которой в наиболее опасной точке наступает предельное состояние. Среднее давление от нагрузки, при которой возникает предельное состояние в наиболее опасной точке, можно использовать для определения первой критической нагрузки Н. М. Герсеванова. Эта критическая нагрузка определяется на основе штамповых испытаний, но как среднее давление, которое в два раза превышает контактное давление под центром жесткого круглого штампа, но меньше контактного давления под краем штампа  $p_{lim}$ . Вместе с тем при таком среднем давлении отказа грунтового основания не происходит, благодаря тому что под штампом расположена грунтовая область, в точках которой эквивалентные напряжения критерия Мора — Кулона еще не достигли предельного значения. Эта область оказывает сопротивление нагрузке, которую можно повышать, вызывая дальнейшее деформирование основания. Увеличение нагрузки можно выполнять до тех пор, пока во всех точках контактной поверхности давление не достигнет предельной величины  $p_{lim}$ . Таким образом, при увеличении нагрузки эпюра контактных давлений под жестким штампом выравнивается так, что с повышением нагрузки ее форма приближается к равномерному давлению.

Анализ эпюры контактных давлений основания и гибкого штампа, нагруженного сосредоточенной силой, показывает, что наибольшая величина давления под центром этого штампа (рис. 1,  $d$ ). Такое же распределение контактных давлений возникает на поверхности песчаных грунтов, воспринимающих нагрузку от жесткого штампа [22—24]. В этом случае при увеличении нагрузки на штамп происходит возрастание контактных давлений, до тех пор пока под центром штампа не будет достигнута его предельная величина  $p_{lim}$ . При дальнейшем увеличении нагрузки давление под центром штампа не возрастает, а форма эпюры контактного давления выравнивается в направлении от центра штампа к его краям, стремясь к равномерному распределению. При воздействии на гибкий штамп равномерно распределенной нагрузки по всей его площади контактные давления под ним распределены равномерно (рис. 1,  $z$ ).

Из нашего анализа следует, что песчаные дополнительные слои основания дорожных одежд и грунты земляного полотна воспринимают нагрузку от гибких штампов, передающих максимальное контактное давление в точке,

принадлежащей оси симметрии нагрузки. Об этом свидетельствуют общепринятые представления, показанные на рис. 1, а. Штамповые испытания выполняются, как правило, жестким штампом.

В нашей работе предпринята попытка разработки корректирующих коэффициентов, позволяющих пересчитывать результаты испытаний жестким штампом в результаты испытаний гибким штампом. Для этих целей использовано общепринятое общее решение о зависимости осадки грунтового основания от давления, в котором учитывается жесткость штампа и местоположение точки, в которой рассчитывается осадка. При расчете осадок грунтовых оснований широкое применение нашли решения, согласно которым осадка жесткого и гибкого штампа определяется по формулам

$$S_{zy} = \frac{w \cdot p \cdot D \cdot (1 - \mu^2)}{E_d}, \quad (8)$$

где  $w$  — коэффициент, постоянный для местоположения рассматриваемой точки и типа круглого штампа по жесткости;  $p$  — среднее давление, Па;  $D$  — диаметр штампа, м;  $\mu$  и  $E_d$  — коэффициент Пуассона и модуль деформации грунта основания, Па.

Подставив в формулу (8) известные значения коэффициента  $w$  для центральной точки жесткого и гибкого круглого штампа, получим выражения для определения осадки основания под жестким  $S_{ж}$  и гибким  $S_{г}$  штампами:

$$S_{ж} = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{p \cdot D (1 - \mu^2)}{E_d}; \quad S_{г} = \frac{p \cdot D (1 - \mu^2)}{E_d}. \quad (9)$$

Формулы (9) применяют для вычисления осадок оснований, из них выводят зависимость для расчета модуля деформации грунта по результатам штамповых испытаний. ГОСТ 20276.1-2020 регламентирует выполнять определение модуля деформации по результатам испытаний жестким штампом. При этом среднее давление и соответствующие им осадки должны изменяться в определенном диапазоне, в котором зависимость осадки от давления можно приближать линейной функцией.

Зависимости (9) постулируют, что при одинаковом среднем давлении осадка жесткого штампа меньше осадки центральной точки гибкого штампа. С другой стороны, формулы (9) позволяют утверждать, что для достижения одинаковых осадок жесткого  $S_{ж}$  и центра гибкого  $S_{г}$  штампов необходимы различные средние давления от жесткого  $p_{ж}$  и гибкого  $p_{г}$  штампов. Это может представлять интерес для корректировки измеренных осадок жесткого штампа в осадку гибкого штампа. Такие корректировки приведены на рис. 2.

Зависимости осадок штампов от давления, представленные на рис. 1, а, получены из предположения, что осадки жесткого штампа измерены, а осадки центра гибкого штампа пересчитаны при тех же давлениях. Такой пересчет вытекает из формул (9), если их решить относительно давлений и записать в виде

$$p = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{S_{ж} \cdot E_d}{D(1 - \mu^2)}; \quad p = \frac{S_{г} \cdot E_d}{D(1 - \mu^2)}. \quad (10)$$

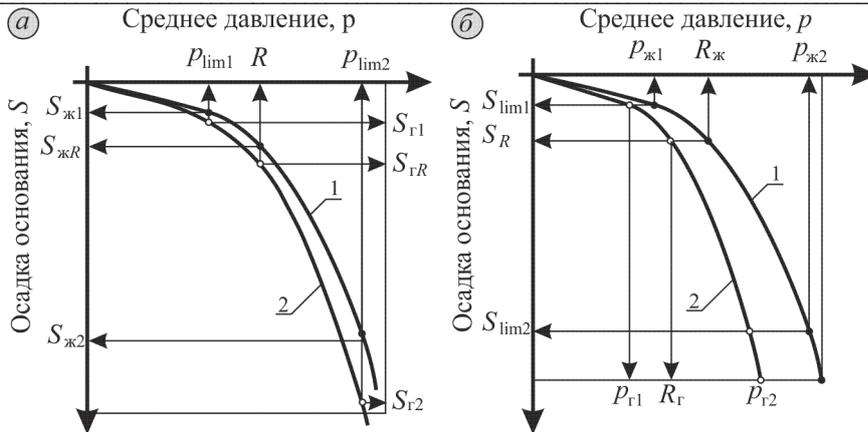


Рис. 2. Зависимости осадки жесткого и гибкого штампов от давления: *a* — корректировка по осадке; *b* — корректировка по давлению; 1 — жесткий штамп (эксперимент); 2 — гибкий штамп (корректировка пересчетом)

Так как зависимости (10) определяют одну и ту же величину среднего давления, соответствующую осадкам штампов, то между этими зависимостями можно положить знак равенства. Тогда после приведения подобных получим соотношение осадок и правило пересчета в виде формул

$$\frac{S_{\text{г}}}{S_{\text{ж}}} = \frac{4}{\pi}; \quad S_{\text{г}} = \frac{4}{\pi} S_{\text{ж}}. \quad (11)$$

Кривая 2, показанная на рис. 1, *a*, иллюстрирует пересчет по правилу (11). На этом рисунке на оси давлений показаны три критические нагрузки: первая  $p_{\text{lim}1}$  и вторая  $p_{\text{lim}2}$  Н. М. Герсеванова, а также расчетное сопротивление грунта. В этом случае критические нагрузки одинаковые и определяются по результатам испытаний жестким штампом, а соответствующие этим нагрузкам осадки разные. Для центра гибкого штампа осадки больше осадок жесткого штампа. Такая корректировка вполне пригодна, но для случая определения штампового модуля деформации, который, согласно зависимостям (9) и (10), одинаков и не зависит от жесткости штампа.

На рис. 2, *b* приведена корректировка давлений от жесткого штампа в давление в центре гибкого штампа. Формулу для этой корректировки можно получить из тех же формул (9), но записав их для одинаковых осадок, но при разных давлениях. В этом случае получим:

$$S = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{p_{\text{ж}} \cdot D(1-\mu^2)}{E_{\text{д}}}; \quad S = \frac{p_{\text{г}} \cdot D(1-\mu^2)}{E_{\text{д}}}; \quad \frac{p_{\text{г}}}{p_{\text{ж}}} = \frac{\pi}{4}; \quad p_{\text{г}} = \frac{\pi}{4} p_{\text{ж}}. \quad (12)$$

Последняя формула из зависимостей (12) является правилом пересчета среднего давления от жесткого штампа в среднее давление от гибкого штампа, которые необходимо приложить для деформирования оснований этими штампами на одну и ту же величину. Это правило распространяется на пересчет первой критической нагрузки, установленной по данным испытаний жестким штампом. Формулы (12) постулируют, что среднее давление от гибкого

штампа всегда меньше среднего давления от жесткого штампа при равных осадках жесткого штампа и центра гибкого штампа.

Таким образом, формулы (11) справедливы для определения параметров деформируемости грунтов под гибким штампом и определения его предельных осадок, а зависимости (12) можно применять для расчета первой критической нагрузки от гибкого штампа.

Методика ГОСТ 20276.1-2020 регламентирует правила определения давления  $p_n$ , ограничивающего область линейного приближения зависимости осадки от давления. Таким образом, это предельное давление является экспериментальным значением первой критической нагрузки. Тем не менее при штамповых испытаниях имеют место случаи, когда начальный участок кривой, отображающий зависимость осадки штампа от давления, является не прямолинейным, как показано на рис. 2, а вогнутым, с крутым нарастанием осадки при незначительном увеличении давления. Вогнутую часть графика использовать нельзя, она должна быть скорректирована. Правила такой корректировки известны давно и утверждены в стандартах США ASTM D1883-2016 и AASHTO T 193-13 (2021). Впоследствии эти правила применены в стандарте РФ ПНСТ 323-2019, являющемся российским аналогом стандартов США.

Суть корректировки вогнутой части графической зависимости осадки от давления и правила определения давления  $p_n$ , регламентированные ГОСТ 20276.1-2020, приведены на рис. 3.

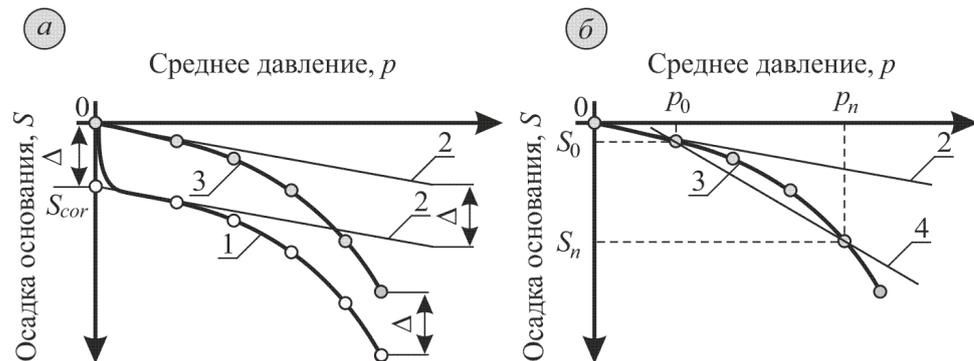


Рис. 3. Корректировка вогнутого начального участка графика осадка — давление и определение первой критической нагрузки: а — корректировка вогнутого участка; б — схема определения давления  $p_n$ ; 1 — экспериментальная кривая, имеющая вогнутый начальный участок; 2 — корректирующая прямая; 3 — скорректированная кривая, из которой вогнутый участок исключен; 4 — прямая линейного приближения зависимости осадки от давления, проведенная через точки с абсциссами  $p_0$  и  $p_n$  и ординатами  $S_0$  и  $S_n$

Для корректировки вогнутого участка экспериментальной кривой 1, показанной на рис. 3, а, необходимо провести корректирующую прямую 2. Эта корректирующая прямая 2 проводится через линейный участок кривой 1, так, чтобы прямая 2 пересекла ось ординат и указала на ней величину — точку  $S_{cor}$ , позволяющую вычислить величину корректировки  $\Delta$  ( $\Delta = S_{cor} - 0$ ). Полученная корректировка  $\Delta$  вычитается из каждой экспериментальной осадки. По полученным данным проводится скорректированная зависимость 3, из которой вогнутый участок исключен.

Скорректированная зависимость 3 применяется для определения первой критической нагрузки  $p_n$ , регламентированной ГОСТ 20276.1-2020 и показанной нами на рис. 3, б. Для этого находят величину давления  $p_0$ , которая определяется величиной вертикального эффективного напряжения от собственного веса грунта на отметке испытания. При испытании грунтовой поверхности дорог величина бытового давления будет равна нулю, значит, в данном случае ее определять не нужно. Далее определяют величину давления  $p_n$ , следуя регламентациям ГОСТ 20276.1-2020. На рис. 3, б нами показаны две приближающие прямые 2 и 4. Прямая 2 для нахождения давления  $p_n$  не применяется, она приведена для концентрации внимания на том, что 2 и 4 являются разными прямыми.

Изложенный анализ можно представить в виде методики экспериментального определения первой критической нагрузки для элементов нежесткой дорожной одежды испытанием жестким штампом.

1. Выполнение подготовки к штампovому испытанию и его проведение в соответствии с регламентациями ГОСТ 20276.1-2020.

2. Построение графика зависимости осадки от давления с оценкой необходимости его корректировки по исключению вогнутого участка, показанной на рис. 3, а.

3. Определение первой критической нагрузки от жесткого штампа, выполненное по скорректированной зависимости осадки от давления по правилам ГОСТ 20276.1-2020, применяемым для определения давления  $p_n$ .

4. Расчет первой критической нагрузки от гибкого штампа, выполняемый по формуле (12).

5. Повторение операций 1—4 на других точках выделенного инженерно-геологического элемента дорожной конструкции.

6. Статистическая обработка результатов определения первой критической нагрузки от гибкого штампа.

### Результаты

Определение экспериментальных значений первой критической нагрузки обусловлено необходимостью проверки сопротивления грунтов сдвигу и обоснования метода расчета грунтов земляного полотна и слоев дорожной одежды из зернистых материалов. Обоснование метода расчета элементов дорожной конструкции по сопротивлению сдвигу можно выполнить только измерением давлений. Суть такого обоснования состоит в сравнении экспериментальных значений первой критической нагрузки с их теоретическими значениями, вычисленными по разным методам [26—29].

На рис. 4 приведены иллюстрации штампovых испытаний в натуральных условиях.

При испытаниях ступени давления назначали так, чтобы они не превышали требования ГОСТ 20276.1-2020 и ОДН 218.5.007-2016. Время стабилизации осадки назначали по уменьшению скорости деформации до 0,01 мм за 1 мин, но это время не было меньше 120 с, рекомендуемых ОДН 218.5.007-2016. Ступени давления указаны в табл. 1.

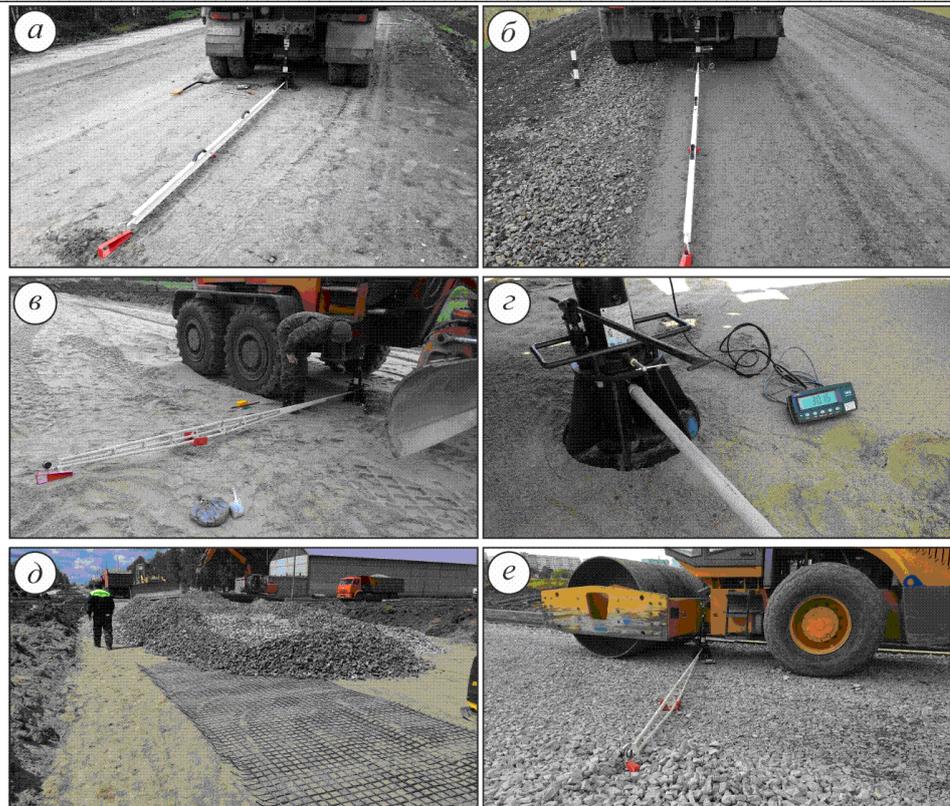


Рис. 4. Штамповые испытания ФГБОУ ВО «СибАДИ» на дорогах и опытных площадках: *a* — испытание земляного полотна в насыпи; *b* — испытание однослойной дорожной одежды из грунтово-щебеночной смеси; *b* — испытание дополнительного песчаного слоя основания; *z* — штамповая установка и электронный динамометр; *d* — устройство опытной площадки с армированным щебеночным основанием; *e* — испытание щебеночного основания

Таблица 1

Степени давления принятые в штамповых испытаниях

Испытываемый конструктивный элемент	Степень давления, МПа	
Земляное полотно из глинистого грунта при относительной влажности $W / W_L$	$\leq 0,75$	0,025
	$> 0,75$	0,010
Земляное полотно и дополнительные слои оснований из песков	Гравелистых и крупных	0,050
	Средних	0,025
	Мелких и пылеватых	0,010
Основания и покрытия дорожных одежд из зернистых материалов	Щебень и гравий из изверженных пород	0,080
	Щебень и гравий из осадочных пород, ЦПС	0,050
	Грунтово-щебеночные смеси	0,025

Примечание.  $W$  и  $W_L$  — влажность грунта и влажность грунта на границе текучести.

Ступени давления, указанные в табл. 1, как правило, меньше степеней давления по ГОСТ 20276.1-2020. Поэтому в наших испытаниях давление при четвертой ступени будет меньше давлений четвертой ступени, принятых по ГОСТ 20276.1-2020. Следовательно, если в качестве критерия определения давления  $p_n$ , ограничивающего линейную зависимость осадки от давления, принять величину давления четвертой ступени, то она будет меньше величины, определенной по ГОСТ 20276.1-2020. Избегая этого, мы сравнивали приращения осадок, полученные от приращения давлений. За первую критическую нагрузку  $p_n$  принималась величина степени давления  $p_i$ , при приложении которой приращение осадки  $\Delta S_i$  оказывалось в два раза меньше приращения осадки  $\Delta S_{i+1}$  от последующей ступени давления  $p_{i+1}$ . Приращение осадок определялось разностями

$$\Delta S_i = S_i - S_{i-1} \text{ и } \Delta S_{i+1} = S_{i+1} - S_i, \quad (13)$$

где  $S_i$  — осадка поверхности от давления рассматриваемой ступени  $p_i$ , мм;  $S_{i-1}$  и  $S_{i+1}$  — осадки, соответствующие предыдущей  $p_{i-1}$  и последующей ступени давления  $p_{i+1}$ , мм.

В результате установлено, что первая критическая нагрузка зависит от влажности связного грунта. При увеличении относительной влажности суглинка легкого, суглинка тяжелого и глины песчанистой первая критическая нагрузка под жестким штампом уменьшилась. Значения первой критической нагрузки от жесткого и гибкого штампов приведены в табл. 2. В этой же табл. указаны ступени давления, при которых была достигнута первая критическая нагрузка.

Таблица 2

Степени давления, принятые в штамповых испытаниях

Грунт	Влажность $W / W_L$	Первая критическая нагрузка, МПа		Степень давления
		Жесткий штамп	Гибкий штамп	
Суглинок легкий	0,58	0,150	0,118	6
	0,61	0,125	0,098	5
	0,74	0,100	0,079	4
	0,86	0,080	0,063	8
Суглинок тяжелый	0,63	0,125	0,098	5
	0,71	0,100	0,079	4
	0,84	0,070	0,055	7
Глина пес- чанистая	0,54	0,175	0,137	7
	0,57	0,150	0,118	6
	0,66	0,125	0,098	5
	0,78	0,100	0,079	10

*Примечание.* Значения первой критической нагрузки для жесткого штампа определены экспериментально по представленной методике, а для гибкого штампа вычислены по формуле (12).

Аналогичные испытания выполнены на поверхности песчаного дополнительного слоя основания, однослойной грунтощебеночной дорожной одежды и на поверхности щебеночного основания. При этом установлено, что наличие песчаного слоя толщиной 20 см позволяет увеличить первую критическую

нагрузку в среднем до 0,125 МПа. Однослойная дорожная одежда толщиной 26 см из грунтово-щебеночной смеси при содержании щебня по объему 50 % и оптимальной влажности грунта (суглинок легкий) увеличивает первую критическую нагрузку до 0,425 МПа. При повышении влажности связного грунта, в наших испытаниях суглинка легкого, в составе смеси приводит к уменьшению первой критической нагрузки. Но даже в расчетный период года первая критическая нагрузка для однослойной дорожной одежды составляет 0,2 МПа, что существенно больше первой критической нагрузки для суглинка легкого в этот период года. В испытаниях на поверхности двухслойной дорожной одежды, включающей верхний щебеночный слой и дополнительный слой основания из песка толщиной по 20 см каждый, повышает первую критическую нагрузку до 0,50 МПа.

Безусловно, что представленная нами методика штамповых испытаний может применяться для определения первой критической нагрузки. Тем не менее применение этой методики позволяет дать лишь приблизительную оценку первой критической нагрузки.

### **Заключение**

Анализ данных табл. 2 показывает, что точность определения первой критической нагрузки на земляное полотно из связных грунтов обуславливается величиной ступеней давления. Так как величина ступени давления уменьшается с увеличением влажности глинистого грунта, то точность определения этой характеристики возрастает с увеличением влажности. Но в любом случае такой способ определения первой критической нагрузки следует считать приближением. В развитие этой методики можно предложить способ, позволяющий выполнять определение первой критической нагрузки как значения, вычисленного между ступенями. Для этого можно рекомендовать следующий способ:

1. Определить уравнение прямой, описывающей зависимость деформаций от давления на линейном участке, т. е. в диапазоне давления  $p_0 \leq p_i \leq p_n$ .
2. Определить уравнение кривой, описывающей зависимость осадки от давлений, превышающих первую критическую нагрузку, т. е. в диапазоне давления  $p_i > p_n$ .
3. Найти абсциссу точки пересечения прямой и кривой, которая будет являться более точным приближением первой критической нагрузки на грунт земляного полотна.

Первая критическая нагрузка, установленная по результатам испытания однослойных и двухслойных дорожных одежд, содержит такой же недостаток. В этом случае при штамповых испытаниях величина ступени давления больше, чем ступень давления на земляное полотно. Поэтому точность определения первой критической нагрузки на дорожную одежду меньше по сравнению с точностью определения этого параметра для земляного полотна.

Кроме того, при испытании однослойных дорожных одежд деформации возникают как в верхнем слое, так и в подстилающем полупространстве. Критическую нагрузку определяют по значению ступени давления, вычисляемой как среднее давление от штампа. В этом случае нагрузка распределяется и передается на подстилающее полупространство по большей площади, но меньшей величины. Нелинейная зависимость осадки от давления может возникнуть как в слое дорожной одежды, так и в грунте земляного полотна. Если

нелинейное деформирование возникает в верхнем слое, то первая критическая нагрузка определена верно. Такой характер деформирования присущ песчаным слоям и слоям из грунтощебеночной смеси с достаточно высокой влажностью связного грунта, применяемого в ней. Но если нелинейное деформирование возникает в грунте земляного полотна, подстилающем испытываемый слой, то первая критическая нагрузка определена неверно. Для материала слоя значение этого параметра будет выше определенного из эксперимента, вследствие того что верхний слой недогружен до появления нелинейной зависимости его осадки от давления. Для грунтового полупространства значение первой критической нагрузки, наоборот, будет меньше величины, определенной по эксперименту. Это связано с тем, что этот параметр определяется по среднему давлению от штампа на верхний слой, а давление на земляное полотно остается неизвестным.

Тем не менее определение первой критической нагрузки в представленном варианте, обладая отмеченными нами недостатками, является средством определения достоверности расчета дорожных конструкций по сопротивлению сдвигу в грунте. Напряжение сдвига, вычисляемое по общепринятому методу расчета, измерить нельзя.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Волкова Е. В., Солоненко А. И. Использование программной системы РАДОН RU для конструирования и расчета дорожной одежды нежесткого типа // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2015. № 13(2). С. 28—33.
2. Неретин А. А., Рукавишников Е. Е. Сравнительное испытание программного обеспечения для расчета дорожных одежд // САПР и ГИС автомобильных дорог. 2014. № 2(1). С. 25—30.
3. Савельев В. В. Автоматизированное проектирование дорожных одежд нежесткого типа // Лесной журнал. 2005. № 2. С. 100—105.
4. Тайлакова А. А., Пимонов А. Г. Оптимизационные модели расчета конструкции нежестких дорожных одежд // Вестн. Кузбас. гос. техн. ун-та. 2015. № 3(109). С. 149—156.
5. Тайлакова А. А., Пимонов А. Г. Web-сервис для поиска оптимальной конструкции нежестких дорожных одежд // Вестн. Кузбас. гос. техн. ун-та. 2015. № 6(112). С. 176—182.
6. Tailakova A., Pimonov A. Optimization methods and algorithms for calculating the construction of non-rigid pavement for technological quarries roads // E3S Web of Conferences. Vol. 134. DOI: 10.1051/e3sconf/201913401007.
7. Сравнительный анализ дорожных конструкций по критерию усталостного разрушения / А. С. Конорев и др. // Инженер. вестн. Дона. 2016. № 4(43). С. 137.
8. Углова Е. В., Шило О. А. Анализ критериев расчета нежестких дорожных одежд в условиях воздействия интенсивного транспортного потока // Интернет-журн. «Транспортные сооружения». 2018. № 3. DOI: 10.15862/14SATS318. URL: <https://t-s.today/PDF/14SATS318.pdf>.
9. Герцог В. Н., Долгих Г. В., Кузин Н. В. Расчет дорожных одежд по критериям ровности. Ч. 1. Обоснование норм ровности асфальтобетонных покрытий // Инженер.-строит. журн. 2015. № 5. С. 45—57.
10. Моисеенко Р. П. Расчет надежности нежестких дорожных одежд методом моментов по критерию допустимого прогиба // Вестн. ТГАСУ. 2017. № 6(65). С. 220—226.
11. Углова Е. В., Конорев А. С. Учет динамического воздействия транспортных средств на нежесткие дорожные покрытия // Наука и техника в дорожной отрасли. 2011. № 1(56). С. 21—24.
12. Углова Е. В., Тиратурия А. В., Ляпин А. А. Комплексный подход к исследованию характеристик динамического деформирования на поверхности нежестких дорожных одежд с использованием методов неразрушающего контроля // Вестн. ПНИПУ. 2016. № 2. С. 111—129.
13. Тиратурия А. В., Ольховой С. А. Оценка деградации прочности нежестких дорожных конструкций на основе натуральных измерений на участке автомобильной дороги М4 «Дон» п. Тарасовский // Инженер. вестн. Дона. 2017. № 2(45). С. 122.

14. *Еганян Г. В.* Механические параметры слоев нежестких дорожных конструкций на стадии проектирования в России и за рубежом // Молодой исследователь Дона. 2018. № 1(10). С. 18—22.
15. *Кирюхин Г. Н.* Сдвигоустойчивость щебеночно-мастичного асфальтобетона // Вестн. ХНАДУ. 2008. № 40. С. 76—79.
16. *Александров А. С., Долгих Г. В., Калинин А. Л.* Эмпирические условия пластичности в расчетах земляного полотна по сдвигу // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2019. № 10(85). С. 7—20. DOI: 10.18720/CUBS.85.1.
17. *Khasanov A., Khasanov Z.* Alternative concepts of the theory of strength of sand soil // Proceedings of the 19<sup>th</sup> International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Seoul, 2017. Pp. 2163—2166.
18. Strength anisotropy and shear band direction in plane strain tests of sand / *Tatsuoka, et al.* // Soils and Foundations. 1990. Vol. 30. Pp. 35—54. DOI: 10.3208/sandf1972.30.35.
19. *Vardoulakis I.* Localization in geomechanics // Proceedings of the 16<sup>th</sup> International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 2005—2006. Pp. 3663—3668. DOI: 10.3233/978-1-61499-656-9-3663.
20. *Gupta A., Kumar P.* Comparative structural analysis of flexible pavements using finite element method // International Journal on Pavement Engineering & Asphalt Technology. 2014. Vol. 15. No. 1. Pp. 11—19. DOI: 10.2478/ijpeat-2013-0005.
21. *Ferretti E.* Satisfying boundary conditions in homogeneous, linear-elastic and isotropic half-spaces subjected to loads perpendicular to the surface: distributed loads on adjacent contact areas // Curved and Layered Structures. 2019. Vol. 6. No. 1. Pp. 11—29. DOI: 10.1515/cls-2019-0002.
22. *Avellan K.* The impact of factors of safety on contact pressure in foundation design and settlement prediction // Processing in Conference : 3<sup>rd</sup> International Soil-Structure Interaction Symposium. Izmir, Turke, 2017. Pp. 1—10.
23. *Guler M. A., Ozturk M., Kucuksucu A.* The frictional contact problem of a rigid stamp sliding over a graded medium // Key Engineering Materials. 2016. Vol. 681. Pp. 155—174.
24. *Barnes G. E.* Contact pressure and stress distribution // Soil Mechanics. London : Palgrave, 1995. Pp. 91—103. DOI: 10.1007/978-1-349-13258-4\_5.
25. Technical proposal for monitoring thermal and mechanical stresses of a runway pavement / *S. Bruno, et al.* // Sensors. 2021. Vol. 21. Pp. 1—15. DOI: 10.3390/s21206797.
26. *Александров А. С.* Анализ методов расчета дорожных конструкций по сопротивлению сдвигу в грунте // Вестн. СибАДИ. 2021. № 5(18). С. 576—613. DOI: 10.26518/2071-7296-2021-18-5-576-613.
27. *Долгих Г. В.* Определение первой критической нагрузки при расчете грунтов земляного полотна по сопротивлению сдвигу // Вестн. МАДИ. 2016. № 3(46). С. 90—97.
28. *Долгих Г. В.* Расчет грунтов земляного полотна по критерию безопасных давлений // Вестн. СибАДИ. 2013. № 6(34). С. 43—49.
29. *Калинин А. Л.* Применение модифицированных условий пластичности для расчета безопасных давлений на грунты земляного полотна // Инженер.-строит. журн. 2013. № 4(39). С. 35—45.

© Александров А. С., Калинин А. Л., Семенова Т. В., 2022

Поступила в редакцию  
в ноябре 2021 г.

Ссылка для цитирования:

*Александров А. С., Калинин А. Л., Семенова Т. В.* Определение первой критической нагрузки для дорожных конструкций // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2022. Вып. 1(86). С. 116—131.

Об авторах:

**Александров Анатолий Сергеевич** — канд. техн. наук, доц. каф. строительства и эксплуатации дорог, Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ). Российская Федерация, 644080, г. Омск, пр. Мира, 5; alexandrov00@mail.ru

**Калинин Александр Львович** — старший преподаватель каф. строительства и эксплуатации дорог, Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ). Российская Федерация, 644080, г. Омск, пр. Мира, 5; a1exandr55ne@mail.ru

**Семенова Татьяна Викторовна** — канд. техн. наук, доц. каф. строительства и эксплуатации дорог, Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ). Российская Федерация, 644080, г. Омск, пр. Мира, 5; stv8@yandex.ru

**Anatoly S. Aleksandrov, Aleksandr L. Kalinin, Tatiana V. Semenova**

**Siberian State Automobile and Highway University**

## **DETERMINATION OF THE FIRST CRITICAL LOAD FOR ROAD STRUCTURES**

It is shown that the calculation of road surfaces based on the shift in the ground of the roadbed is an analog of the calculation of allowable pressures. Moreover, if the value of the allowable pressure is calculated from the Mohr — Coulomb plasticity condition, then the calculation boils down to checking the condition according to which the pressure should not exceed the first critical load. The advantage of calculating by safe pressure is the possibility of determining the first critical load according to experimental data, and it is impossible to measure the shear stress on the sliding platform drawn through the most dangerous point. A method for determining the first critical load has been developed, taking into account the differences in the stress-strain state of the roadbed and the layers of the pavement when exposed to loads from rigid and flexible stamps. The results of the experiment and the data of their statistical processing are presented.

**К е y w o r d s:** road pavement, shear resistance, first critical load, the Mohr — Coulomb criterion with three parameters.

### *For citation:*

Aleksandrov A. S., Kalinin A. L., Semenova T. V. [Determination of the first critical load for road structures]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2022, iss. 1, pp. 116—131.

### *About authors:*

**Anatoly S. Aleksandrov** — Candidate of Engineering Sciences, Siberian State Automobile and Highway University (SibADI). 5, Mira Ave., Omsk, 644080, Russian Federation; aleksandrov00@mail.ru

**Aleksandr L. Kalinin** — Senior Lecturer, Siberian State Automobile and Highway University (SibADI). 5, Mira Ave., Omsk, 644080, Russian Federation; a1exandr55ne@mail.ru

**Tatiana V. Semenova** — Candidate of Engineering Sciences, Siberian State Automobile and Highway University (SibADI). 5, Mira Ave., Omsk, 644080, Russian Federation; stv8@yandex.ru