

УДК 625.8

А. С. Александров, Г. В. Долгих, А. С. Пролыгин

Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет

УЧЕТ КОНЦЕПЦИИ КАЖУЩЕГОСЯ СЦЕПЛЕНИЯ В РАСЧЕТЕ ДОРОЖНОЙ ОДЕЖДЫ ПО СОПРОТИВЛЕНИЮ СДВИГУ

В результате анализа требований ОДН 218.046—01 и ГОСТ Р 71404—2024 установлено, что в нормативных методах расчета используются два различных подхода к количественной оценке работы конструкции в зоне контакта слоев дорожной одежды при расчете по сопротивлению сдвигу. Метод, изложенный в ОДН 218.046—01, основан на концепции кажущегося сцепления, возникающего при устройстве разделяющей прослойки из геосинтетического материала или укрепленных слоев, влияние которого моделируется как увеличение адгезии (сцепления) между грунтом и армирующим элементом. Современный подход, представленный в ГОСТ Р 71404—2024, использует иную гипотезу, которая, по нашему мнению, приводит к некорректному моделированию сопротивления сдвигу. Авторы показали правомерность суждений ОДН 218.046—01 и ошибочность положений ГОСТ Р 71404—2024.

Ключевые слова: сопротивление сдвигу, кажущееся сцепление, геосинтетический материал.

Введение

В настоящее время специалисты дорожной отрасли пересматривают нормативные методы расчета нежестких дорожных одежд. В данном направлении ведутся работы по модификации расчетов дорожных одежд как по предельному состоянию конструкции (расчет по критерию упругого прогиба), так и по предельному состоянию в точке среды (например, расчет по сопротивлению сдвигу в грунте) [1]. Безусловно, традиционный расчет нежесткой дорожной одежды, регламентируемый нормативными документами, нуждается в модификации, причем по отдельным критериям — в коренной переработке.

Изучение истории развития расчета нежесткой дорожной одежды, изложенной в нормативных документах, показывает, что первый коренной пересмотр произошел при переходе от правил проектирования по ВСН 46—60 (метод СоюзДорНИИ) к правилам расчета по ВСН 46—72 (решение на основе применения линейной теории упругости многослойной среды к двухслойным и трехслойным моделям). Суть этого коренного пересмотра заключается в том, что метод СоюзДорНИИ, разработанный под руководством проф. Н. Н. Иванова, был заменен на решения специалистов ленинградской школы. Решение Н. Н. Иванова базируется на геометрических и физических уравнениях теории упругости и состоит в определении вертикального перемещения поверхности двухслойного полупространства от воздействия осесимметричной нагрузки. В настоящее время это решение регламентируется ГОСТ Р 71244—2024¹. Отсюда следует, что не все специалисты, разрабатывающие нормативные документы,

¹ ГОСТ Р 71244—2024. Дороги автомобильные с низкой интенсивностью движения. Дорожная одежда: проектирование и расчет (утв. и введен в действие приказом Федер. агентства по техн. регулированию и метрологии от 7 фев. 2024 г. № 204-ст). М. : Рос. ин-т стандартизации, 2024.

согласны с традиционным расчетом дорожных одежд по ГОСТ Р 71404—2024² и его применением в части расчета дорожных одежд переходного и низшего типов.

В связи с наличием разных мнений авторы данной публикации считают необходимым разъяснить суть решений Н. Н. Иванова (ГОСТ Р 71244—2024) и решения, полученного применением линейной теории упругости двухслойной (ГОСТ Р 71404—2024, разд. 9.3—9.5) и многослойной (ГОСТ Р 71404—2024, прил. Д) среды. При этом поясним причины отказа от решения Н. Н. Иванова, отсутствия целесообразности перехода от решения теории линейной упругости для двухслойной среды к аналогичному решению по той же линейной теории упругости для многослойной среды. Кроме того, подробно рассмотрим задачу расчета предельного напряжения сдвига в грунте земляного полотна при применении в конструкции дорожной одежды геотекстильных материалов. По второму вопросу авторы дадут пояснения к концепции кажущегося сцепления грунта с геосинтетическим материалом, на основе чего покажут ошибку, кроющуюся в расчете по ГОСТ Р 71404—2024.

Итак, в основе расчета дорожной одежды по методу СоюзДорНИИ лежат геометрические уравнения теории упругости (уравнения Коши), согласно которым понятие деформации тела можно сформулировать как пространственную производную от перемещения. Эти традиционные уравнения имеют вид:

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}; \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y}; \varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z}; \gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}; \gamma_{yz} = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}; \gamma_{xz} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}, \quad (1)$$

где u , v и w — три перемещения точки тела соответственно; ε_x , ε_y , и ε_z — нормальные деформации точки тела в направлении осей x , y и z ; γ_{xy} , γ_{yz} и γ_{xz} — угловые деформации или деформации сдвига, испытываемые точкой упругого тела и в силу закона парности имеющие равные по модулю, но противоположные по знаку (направлению) угловые деформации γ_{yx} , γ_{zy} и γ_{zx} соответственно.

При решении осесимметричной задачи об осадке полупространства решается обратная задача, связанная с необходимостью вычисления вертикального смещения точки тела. Поэтому можно воспользоваться следствием из формул (1), согласно которому перемещение w может быть найдено интегрированием деформации ε_z по глубине, т. е. по dz . Для полупространства неограниченного по глубине справедлив интеграл

$$w = \int_0^{\infty} \varepsilon_z(z) dz, \quad (2)$$

где $\varepsilon_z(z)$ — функция изменения вертикальной деформации по глубине.

Решение в виде интеграла (2) раскрывает первый недостаток метода СоюзДорНИИ: он связан с тем, что определяется только вертикальное перемещение. Для решения задачи об осадке грунтового основания или поверхности

² ГОСТ Р 71404—2024. Дороги автомобильные общего пользования. Нежесткие дорожные одежды. Правила проектирования (взамен ПНСТ 542-2021) (утв. и введен в действие приказом Федер. агентства по техн. регулированию и метрологии от 5 авг. 2024 г. № 1022-ст). М. : Стандартинформ, 2024.

слоя из зернистого материала, работающих в условиях трехосного сжатия, этого достаточно. Для расчета слоев из монолитных материалов интеграла (2) — недостаточно: в этом случае необходимо определить все компоненты тензоров напряжений и деформаций и три перемещения.

Второй недостаток метода СоюзДорНИИ связан с упрощениями функции изменения вертикальной деформации по глубине двухслойной модели. Согласно общепринятым правилам, при выводе формулы для расчета вертикального перемещения полупространства в интегральное уравнение (2) необходимо подставить одно из шести физических уравнений теории упругости. Это уравнение связывает вертикальную деформацию ε_z с нормальными напряжениями σ_z , σ_x и σ_y , а также упругими постоянными материала (продольный модуль упругости E и коэффициент Пуассона μ). В методе СоюзДорНИИ использовано упрощение, согласно которому горизонтальные нормальные напряжения равны нулю, т. е. $\sigma_x = \sigma_y = 0$. В этом случае задача о перемещении поверхности полупространства, испытывающего осевое трехосное сжатие, сводится к решению одномерной задачи, предполагающей одноосное сжатие. Помимо упрощения, связанного с постулированием одноосного сжатия, метод СоюзДорНИИ содержит приближение в виде формулы М. И. Якунина, связывающей вертикальное нормальное напряжение с глубиной и модулями упругости материалов верхнего слоя (слой конечной толщины) и нижнего слоя (полупространство бесконечной толщины, подстилающее верхний слой) двухслойной системы. В результате таких упрощений и приближений интегральное уравнение (2) приведено к следующему виду:

$$l = \int_0^{\infty} \frac{\sigma_z}{E} dz = \frac{1}{E} \int_0^{\infty} \frac{pdz}{1 + a \left(\frac{h_{\text{эКВ}}}{D_0} \right)^2} = \frac{1}{E} \int_0^{\infty} \frac{pdz}{1 + a \left(\frac{z}{D_0} \sqrt[2,5]{\frac{E_1}{E_2}} \right)^2}, \quad (3)$$

где p — давление на покрытие, МПа; $h_{\text{эКВ}}$ — эквивалентная толщина, м; z — расстояние от поверхности до рассматриваемой точки, м; D_0 — диаметр круга, равновеликого по площади отпечатку следа от колеса расчетной нагрузки, м; E_1 и E_2 — модуль упругости материала верхнего слоя и общий модуль упругости на поверхности нижнего слоя двухслойной системы, МПа; a — коэффициент, учитывающий тип дорожной одежды (для нежесткой $a = 1$).

Интегрирование функции (3) выполняется отдельно для верхнего и нижнего слоя двухслойной системы. Область интегрирования в верхнем слое задана его толщиной, т. е. от нуля до h . Область интегрирования в нижнем слое определена от h до бесконечности. Уравнение (3) раскрывает еще один недостаток метода СоюзДорНИИ. Этот недостаток состоит в невозможности применения к расчету дорожной одежды по критерию сопротивления сдвигу в материале подстилающего полупространства любого условия пластичности грунта, за исключением первой теории прочности. Таким образом, метод СоюзДорНИИ не позволял применить в расчете дорожной одежды критерий Мора — Кулона, предельное состояние которого характеризует величину давления, численно равную первой критической нагрузке Н. М. Герсеванова [2, 3]. В свою очередь, первая критическая нагрузка показывает наибольшую величину давления, при котором сохраняется линейная зависимость

между упругопластической осадкой основания и давлением. Таким образом, возникла необходимость коренного пересмотра правил расчета дорожной одежды.

В результате возникновения такой необходимости внимание специалистов привлекла работа Д. М. Бурмистера [4], в которой получено решение о напряженно-деформированном состоянии двухслойной системы в цилиндрических координатах. Схема решения задачи, разработанная Д. М. Бурмистером, стала основой для всех последующих решений. Согласно постановке задачи, в качестве неизвестных принимаются четыре напряжения (нормальные: вертикальное σ_z , радиальное σ_r и тангенциальное σ_θ , а также касательное τ_{rz}) и два перемещения (вертикальное w и горизонтальное u). Целью задачи является поиск системы функций, применяемых в расчете каждой неизвестной, удовлетворяющих бигармоническому уравнению при заданных граничных условиях на поверхности и между слоями. Следует заметить, что вопрос о несоответствии расчетной схемы двухслойного полупространства, принятой Д. М. Бурмистером в своем решении, реальным конструкциям аэродромных и дорожных одежд был отмечен в первой же работе Д. М. Бурмистера [4]. Этот вопрос обсуждался во второй части этой работы, в нем приняли участие известные специалисты старшего поколения: Л. А. Палмер, Э. С. Барбер, А. Касагранде и Т. А. Миддлбрукс. Этот вопрос стал предметом обсуждения в российских работах настоящего времени [5—7]. Здесь нужно отметить, что решение, учитывающее многослойность дорожной одежды, точнее, чем решения для двух- и трехслойных моделей. Однако также необходимо принять во внимание применимость линейной теории упругости к расчету нежестких дорожных одежд, конструкции которых включают большую номенклатуру материалов. Например, известно, что зернистые материалы даже при сравнительно малых нагрузках проявляют свойства нелинейно-упругого материала. При более высоких нагрузках зернистые материалы испытывают необратимые деформации, возвращая только часть работы, затраченной на их деформирование. Неспособность грунтов земляного полотна и зернистых материалов, применяемых в слоях дорожной одежды, работать исключительно в упругой стадии объясняется законами изменения объема и формы. Объемные деформации прежде всего объясняются средним нормальным напряжением (шаровая составляющая тензора напряжений). Объемная деформация грунтов и зернистых материалов, как правило, является упругопластической. При таком деформировании остаточная составляющая деформации обусловлена уплотнением, в результате которого уменьшается пористость и возрастает число контактов между зернами минеральной части. В процессе действия повторных нагрузок эта деформация затухает, но при условии возникновения малых девиаторов напряжения. Деформации сдвига, как правило, являются необратимыми деформациями. Согласно закону изменения формы, девиатор напряжений пропорционален девиатору деформаций. При малых напряжениях сдвига малы и деформации сдвига, но на вопрос об их величине и продолжительности накопления линейная и нелинейная теория упругости ответа не дает. В этом случае необходимо применять другие теории механики сплошной среды, например теорию пластичности или приспособляемости [8—16]. Несоответствие реального характера деформирования дорожной одежды линейно-упругому, заложенному в основу их проектирования, подтверждено

экспериментально на основе изучения причин образования колеи и процесса накопления остаточных деформаций [17—21].

Следовательно, замена классического решения линейной теории упругости, полученного для двухслойной среды, на аналогичное решение для многослойной среды адекватность расчета нежесткой дорожной одежды особо не повысит. По этой причине специалисты старшего поколения в качестве инженерного расчета дорожных одежд стали использовать номограмму П. И. Теляева, разработанную на основе решения Б. И. Когана для двухслойной среды, но ввели две проверки. Первая проверка выполняется по сопротивлению сдвигу, а вторая производится по сопротивлению усталостному разрушению от растяжения при изгибе. Целью нашей работы является уточнение расчета по сопротивлению сдвигу армированных конструкций.

Основная часть

1. Материалы и методы

Основы расчета по сопротивлению сдвигу созданы А. М. Кривисским, они изложены в фундаментальной работе специалистов старшего поколения [22]. Расчет разработан в прошлом столетии и начал применяться в практике проектирования дорог в ВСН 46—72. За это время расчет претерпел несколько модификаций, изложенных в ВСН 46—83, ОДН 218.046—01, ПНСТ 265—2018, ПНСТ 542—2021 и ГОСТ Р 71404—2024. Казалось бы, все детали этого расчета должны быть хорошо известны, но в настоящее время все чаще высказывается утверждение, что это расчет по так называемому межслойному сдвигу, а не по сдвигу в грунте земляного полотна. Поэтому необходимо внести ясность, какой сдвиг является предметом расчета по нормативным методикам, чем он отличается от расчета по межслойному сдвигу и почему произошел отказ от расчета по межслойному сдвигу и от номограмм по расчету дорожных одежд с гладким контактом между слоями. Различие расчетов по сопротивлению сдвигу в грунте земляного полотна и между слоями покажем в виде двух расчетных схем (рис. 1).

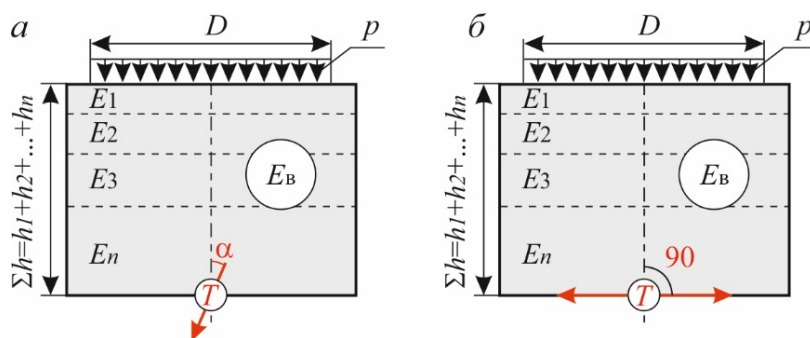


Рис. 1. Расчетные схемы дорожной одежды по сопротивлению сдвигу:
а — классическая расчетная схема, применяемая в методе А. М. Кривисского;
б — расчетная схема по межслойному сдвигу

Как известно, классический расчет по сопротивлению сдвигу основан на определении напряжения сдвига от двух нагрузок: временной (транспортной) $T_{ав}$ и постоянной (собственный вес конструкции, расположенной выше рассчитываемого элемента) $T_{ан}$. Критерий расчета можно представить в виде

$$T_{ав} + T_{ан} \leq k_d \cdot c_N, \quad (4)$$

где c_N — сцепление грунта, МПа; k_d — коэффициент перехода к кажущемуся сцеплению, возникающему между грунтом и геосинтетикой.

Напряжение сдвига от временной $T_{ав}$ рассчитывается через главные напряжения, которые, в свою очередь, вычисляются через компоненты тензора напряжений. Компоненты тензора напряжений определены для цилиндрической системы координат (нормальные σ_z , σ_r и σ_θ , а также касательное τ_{rz}). При расчете главных напряжений для схемы, показанной на рис. 1, а, необходимо задействовать компоненты σ_z , σ_r и τ_{rz} , что и сделал А. М. Кривисский, а за ним и все его последователи. Именно этот расчет используется в нормативных документах, в нем напряжения сдвига от действия временной нагрузки вычисляются по формулам

$$T_{ав} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2 \cdot \cos \varphi_N} - \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \tan \varphi_N, \quad (5)$$

где σ_1 и σ_3 — главные напряжения, максимальное и минимальное соответственно, МПа; φ_N — угол внутреннего трения;

$$\sigma_1 = \frac{1}{2} \left[(\sigma_z + \sigma_r) + \sqrt{(\sigma_z - \sigma_r)^2 + 4 \cdot \tau_{rz}^2} \right]; \quad (6)$$

$$\sigma_3 = \frac{1}{2} \left[(\sigma_z + \sigma_r) - \sqrt{(\sigma_z - \sigma_r)^2 + 4 \cdot \tau_{rz}^2} \right]. \quad (7)$$

В формулах (6) и (7) главные напряжения определяются через нормальное и касательное напряжения σ_z и напряжения τ_{rz} , которые указывают, что площадка сдвига в нормативных расчетах не имеет отношения к сдвигу между слоями. При расчете главных напряжений по схеме межслойного сдвига необходимо оперировать другими компонентами тензора напряжений, которыми являются нормальное радиальное напряжение σ_r , нормальное тангенциальное напряжение σ_θ , а также касательное напряжение $\tau_{\theta r}$, которое в общепринятом решении попросту не определено, но в силу осевой симметрии задачи можно полагать $\tau_{\theta r} = 0$. В 80-х гг. XX века предпринимались попытки решения задачи о межслойном сдвиге, но от этого решения отказались. Также отказались от решения, предполагающего гладкий контакт между слоями. Это произошло из-за того, что при воздействии транспортной нагрузки слои дорожной одежды, испытывая прогиб, прижимаются. Поэтому реальный контакт слоев ближе к спаянному, нежели к гладкому. Из-за понимания этого процесса в ВСН 46—83 оставили номограммы, предполагающие спаянный контакт, а номограммы, построенные для расчета дорожной одежды с гладким контактом, в этот документ не вошли, они остались в истории (ВСН 46—72). Авторы также добавят, что все решения теории упругости предполагают контакт слоев по прямой линии, параллельной поверхности дорожной одежды. То есть общепринятый расчет не учитывает шероховатость контактирующих поверхностей и не учитывает шероховатость зерен щебня. Если мы примем во внимание макрошероховатость и микрошероховатость контактирующих слоев, то придем к выводу, что реальный контакт может быть больше, чем спаянный, он не

может быть гладким даже при условии отсутствия прогиба. То есть сама текстура контактирующих слоев создает точки контакта.

Теперь рассмотрим кажущееся сцепление, которое устанавливается по данным трехосных испытаний грунтовых образцов, армированных и неармированных геосинтетическим материалом. На рис. 2 приведены схемы армирования образцов при трехосных испытаниях и общий вид этих образцов в предельном состоянии [23].

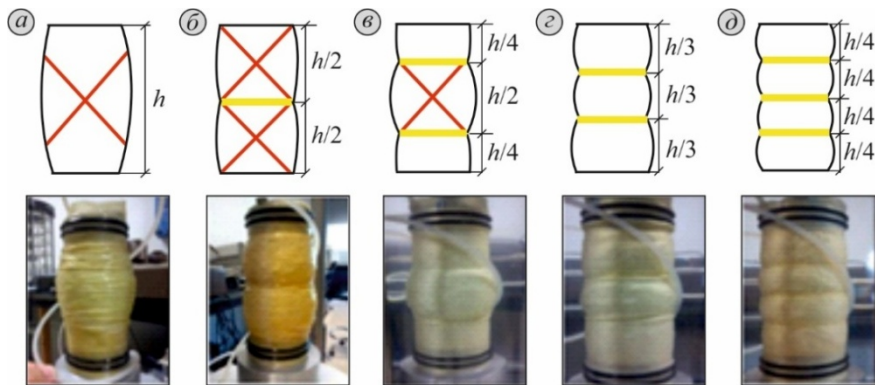


Рис. 2. Схемы армирования образцов для трехосных испытаний и их общий вид в предельном состоянии по завершении теста [23]:

a — неармированный (эталонный) образец; *б, в, г и д* — армированные образцы с указанием местоположения геосинтетического материала

На рис. 3 приведены круги предельных напряжений и касательные к ним, иллюстрирующие интерпретации результатов трехосных испытаний по общепринятым концепциям [19].

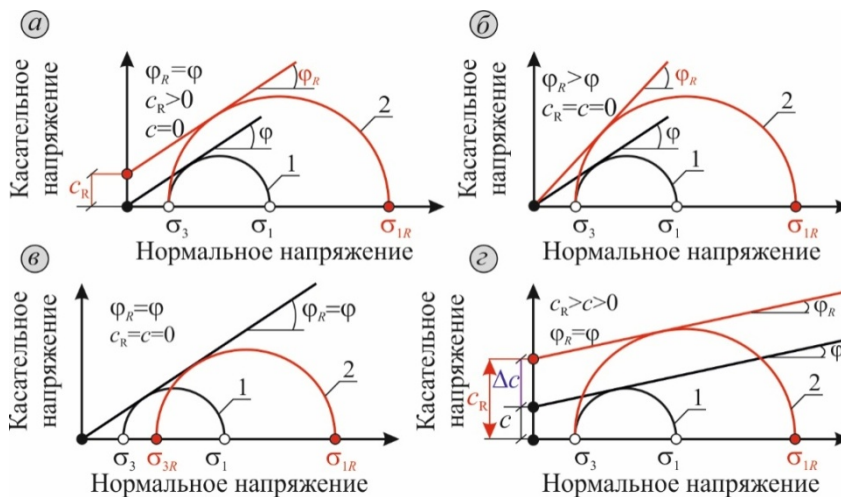


Рис. 3. Круги предельных напряжений и касательные к ним, интерпретирующие результаты трехосных испытаний неармированного и армированного образца [24]:

a — концепция кажущегося сцепления; *б* — концепция кажущегося угла внутреннего трения; *в* — концепция увеличения удерживающего давления; *г* — концепция кажущегося сцепления в интерпретации научной группы В. Д. Казарновского (ОДН 218.046—01):

1 и 2 — неармированный и армированный образец соответственно

2. Результаты

В настоящем подразделе рассмотрим общепринятые методы трехосных испытаний, показанные на рис. 2, и поясним суть концепций, раскрывающих влияние геосинтетического материала на сопротивление сдвигу армированного грунта. Кроме того, авторы покажут вывод критерия прочности грунта, базируясь на концепции кажущегося сцепления, принятой в трактовке научной группы В. Д. Казарновского (см. рис. 3, *д*). Также покажем правила определения коэффициента k_d , который был введен научной группой В. Д. Казарновского и впервые использовался в методике расчета по ОДН 218.046—01. В. Д. Казарновский и его ученики для определения коэффициента k_d использовали концепцию кажущегося сцепления грунта с геосинтетическим материалом. Эта концепция базируется на результатах трехосных испытаний образцов грунта, армированных геосинтетикой [23, 24].

В основе концепций, отражающих армирующий эффект геосинтетического материала, лежат результаты трехосных испытаний. Из анализа данных рис. 2 следует, что эталонный (неармированный) образец имеет стандартное для трехосных испытаний отношение высоты h к диаметру d ($h/d \geq 2$, как правило, $h/d = 2$). Такой образец разрушается по наклонной площадке (площадке сдвига), что показано на рис. 2, *а*. Другие образцы, показанные на рис. 2, армированы разным количеством геосинтетических прослоек. В этом случае геосинтетика разделяет образец на части, у каждой из которых отношение высоты к диаметру меньше, чем у эталонного образца. Из анализа рис. 2 следует, что площадки сдвига в армированных образцах формируются только в тех случаях, если расстояние между геосинтетическими прослойками не меньше половины высоты образца, т. е. при условии $h/d \geq 2$. В остальных случаях, при меньших расстояниях между геосинтетическими прослойками, разрушение происходит за счет бокового выпирания грунта, иногда такое разрушение называют «бочкообразным».

В общепринятых концепциях эффект армирования образца объясняется способностью геосинтетики работать на растяжение, проявляющейся при трехосных испытаниях. Особенностью трехосных испытаний является то, что образцы грунта, армированные геосинтетическим материалом, разрушаются при более высоких значениях максимального главного напряжения σ_1 , по сравнению с неармированными образцами, испытанными при тех же значениях минимального (удерживающего) главного напряжения σ_3 (см. рис. 3). В результате этого экспериментально установленного факта диаметр кругов предельных напряжений для армированных образцов был больше диаметра кругов для неармированных образцов.

В классической концепции кажущегося сцепления касательную к кругам предельных напряжений армированных образцов строят путем параллельного переноса (подъема вверх) предельной прямой для неармированных образцов (см. рис. 3, *а* и рис. 3, *д*). В этом случае угол внутреннего трения получают одинаковым для неармированных и армированных образцов, а сцепление разное. Для армированных образцов сцепление имело более высокую величину, которую назвали кажущимся сцеплением. Если кажущееся сцепление обозначить c_R , то отношение этого сцепления к сцеплению грунта c_N определит коэффициент k_d . Таким образом, в расчете по сопротивлению сдвигу

известный коэффициент k_d относится только к сцеплению грунта, позволяя осуществить переход к кажущемуся сцеплению в тех случаях, когда в конструкцию введен геосинтетический материал.

К углу внутреннего трения, как это сделано в расчетах по ПНСТ 265—2018, ПНСТ 542—2021 и ГОСТ Р 71404—2024, этот коэффициент не имеет никакого отношения. На рис. 3, б приведена концепция кажущегося угла внутреннего трения, при использовании которой полагают, что сцепление грунта в армированном и неармированном образце одинаково, а угол внутреннего трения разный.

Концепция увеличивающегося удерживающего давления, показанная на рис. 3, в, постулирует, что для уменьшения деформации бокового расширения грунта к нему со стороны геосинтетического материала необходимо прикладывать дополнительное давление. В этом случае удерживающее напряжение σ_3 для армированного грунта будет больше, чем для неармированного образца. Это значит, что предельное максимальное главное σ_1 напряжение и предельный девиатор ($q = \sigma_1 - \sigma_3$), необходимые для разрушения армированного образца, будут больше, чем для неармированного образца. В этом случае интерпретация результатов трехосных испытаний может состоять в повышении для армированного образца минимального и максимального главных напряжений, а равно и предельного девиатора q , по сравнению с аналогичными характеристиками напряженного состояния неармированного образца. При этом сцепление и угол внутреннего трения армированного и неармированного образцов могут оставаться одинаковыми, как показано на рис. 3, в. В этом случае эффект армирования проявляется в увеличении удерживающего напряжения σ_3 и связанном с ним повышении величины предельного девиатора q и критической величины σ_1 .

В условии прочности грунта, записанном неравенством (4), мы применили концепцию кажущегося сцепления в трактовке В. Д. Казарновского. Напряжение сдвига от временной нагрузки определяется по формуле (5) с расчетом главных напряжений по зависимостям (6) и (7).

Напряжение сдвига от постоянной нагрузки можно определить либо с учетом закона упругости А. Динника, либо с учетом закона А. Гейма. В первом случае получим

$$T_{\text{ан}} = \frac{\gamma_{\text{ср}} \cdot z - \xi \cdot \gamma_{\text{ср}} \cdot z}{2 \cdot \cos \varphi_N} - \frac{\gamma_{\text{ср}} \cdot z + \xi \cdot \gamma_{\text{ср}} \cdot z}{2} \tan \varphi_N, \quad (8)$$

где $\gamma_{\text{ср}}$ — средневзвешенная объемная плотность конструктивных слоев, расположенных выше проверяемого слоя, кН/м^3 ; z — глубина расположения поверхности слоя, проверяемого на сдвигоустойчивость, от верха конструкции, м; ξ — коэффициент бокового давления или коэффициент А. Динника.

В общепринятых решениях XXI столетия $\xi = 1$, тогда зависимость (8) примет вид

$$T_{\text{ан}} = -\gamma_{\text{ср}} \cdot z \cdot \tan \varphi_N. \quad (9)$$

Подставив зависимость (9) в критерий (4), получим:

$$T_{ав} - \gamma_{ср} \cdot z \cdot \tan \varphi_N \leq k_d c_N; T_{ав} \leq k_d c_N + \gamma_{ср} \cdot z \cdot \tan \varphi_N. \quad (10)$$

Из анализа формул (10) следует, что предельное напряжение сдвига грунтов, армированных геосинтетическим материалом, определяется по формуле

$$T_{пр} = k_d c_N + \gamma_{ср} \cdot z \cdot \tan \varphi_N. \quad (11)$$

В формуле (11) коэффициент k_d относится только к сцеплению, он не влияет на величину второго слагаемого. Полученная нами зависимость отличается как от формулы В. Д. Казарновского (ОДН 218.046—01), так и от выражений, применяемых в ПНСТ 265—2018, ПНСТ 542—2021 и ГОСТ Р 71404—2024. Для удобства сравнения все варианты расчета предельного напряжения сдвигу приведены в табл.

Расчет предельного напряжения сдвигу по различным стандартам РФ

Документ	Формула расчета
ОДН 218.046—01	$T_{пр} = k_d c_N + \gamma_{ср} \cdot z \cdot \tan \varphi_{ст}$
ПНСТ 265—2018, ПНСТ 542—2021	$T_{пр} = k_d (c_N + \gamma_{ср} \cdot z \cdot \tan \varphi_{ст})$
ГОСТ Р 71404—2024	$T_{пр} = k_d (c_N + \gamma_{ср} \cdot z \cdot \tan \varphi_N)$

Заключение

В заключение отметим ключевые отличия предлагаемой зависимости (11) от ее аналогов, применяемых в различных нормативных документах и стандартах Российской Федерации. Расчет предельного напряжения сдвига $T_{пр}$ в грунте, армированном геосинтетическим материалом, по ОДН 218.046—01 содержит верную трактовку концепции кажущегося сцепления. Однако во втором слагаемом этой зависимости содержится статический угол внутреннего трения $\varphi_{ст}$. Следовательно, предельное напряжение сдвига по ОДН 218.046—01 определяется на площадке, повернутой к главным осям под углами $\alpha_1 = 45 - 0,5 \cdot \varphi_{ст}$ и $\alpha_3 = 45 + 0,5 \cdot \varphi_{ст}$. Активное напряжение сдвига от действия транспортной нагрузки T по ОДН 218.046—01 вычисляется по формуле (5) при динамическом угле внутреннего трения φ_N . То есть активное напряжение сдвига, возникающее от действия транспортной нагрузки, находится для площадки, повернутой к главным осям под углами $\alpha_1 = 45 - 0,5 \cdot \varphi_N$ и $\alpha_3 = 45 + 0,5 \cdot \varphi_N$. Если $N > 1$, то $\varphi_N < \varphi_{ст}$. Это значит, что T и $T_{пр}$ определены для разных площадок, что является ошибкой. Эта же ошибка характерна для расчета по ПНСТ 265—2018 и ПНСТ 542—2021. Кроме того, в этих стандартах в формуле расчета $T_{пр}$ введены скобки. В результате формула, рекомендуемая ПНСТ 265—2018 и ПНСТ 542—2021, противоречит концепции кажущегося сцепления. Следовательно, формула, применяемая для расчета $T_{пр}$ в ПНСТ 265—2018 и ПНСТ 542—2021, содержит две ошибки. Рассматривая аналогичную зависимость, регламентируемую действующим ГОСТ Р 71404—2024, можно констатировать, что в ней нарушена концепция кажущегося сцепления, а также в неявном виде содержится первая ошибка. Для пояснения этого вывода возьмем формулу из табл. и раскроем скобки, тогда получим

$$T_{\text{пр}} = k_d \cdot c_N + k_d \cdot \gamma_{\text{ср}} \cdot z \cdot \tan \varphi_N. \quad (12)$$

В своем анализе мы уделим внимание второму слагаемому формулы (12), сопоставив входящие в него характеристики с расчетной схемой, показанной на рис. 1, а. Согласно расчетной схеме, толщины конструктивных слоев и используемые в них материалы заданы. Вследствие этого множитель в виде коэффициента k_d нельзя отнести к весу $\gamma_{\text{ср}}$ и суммарной толщине слоев z . Поэтому множитель в виде коэффициента k_d можно отнести только к тангенсу угла φ_N . В результате увеличения тангенса угла φ_N мы получим значение тангенса, но другого угла, который обозначим β . В этом случае справедливы формулы

$$\tan \beta = k_d \cdot \tan \varphi_N; \quad \beta = \arctan(k_d \cdot \tan \varphi_N). \quad (13)$$

Так как $\beta \neq \varphi_N$, то в расчете по ГОСТ Р 71404—2024 активное напряжение сдвига T определено для площадки, повернутой к главным осям под теми же углами $\alpha_1 = 45 - 0,5 \cdot \varphi_N$ и $\alpha_3 = 45 + 0,5 \cdot \varphi_N$, а его предельное значение вычисляется для другой площадки, наклоненной к главным осям под углами $\alpha_1 = 45 - 0,5 \cdot \beta$ и $\alpha_3 = 45 + 0,5 \cdot \beta$. Следовательно, в ГОСТ Р 71404—2024 содержатся те же ошибки, что и в предварительных стандартах.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Александров А. С. Развитие расчета дорожной одежды по сопротивлению грунтов сдвигу // Вестн. Волгогр. гос. архитектур.-строит. ун-та. Сер. : Стр-во и архитектура. 2023. Вып. 1(90). С. 93—105.
2. Определение угла ориентации площадки наиболее вероятного сдвига в точке грунтового массива и процесс развития областей пластических деформаций в однородном основании ленточного фундамента мелкого заложения / А. Н. Богомолов, М. А. Шубин, В. Н. Синяков и др. // Интернет-вестн. ВолгГАСУ. 2012. № 8(24). С. 11.
3. Александров А. С., Калинин А. Л., Семенова Т. В. Определение первой критической нагрузки для дорожных конструкций // Вестн. Волгогр. гос. архитектур.-строит. ун-та. Сер. : Стр-во и архитектура. 2022. Вып. 1(86). С. 116—131.
4. Burmister D. M. The theory of stresses and displacements in layered systems and application to the design of airport runways // Proceedings. Highway Research Board. 1943. Vol. 23. Pp. 126—148.
5. Горский М. Ю., Кадыров Г. Ф., Стрельцов А. В., Симчук Е. Н. Совершенствование методики расчета жестких дорожных одежд с учетом применения решения задачи теории упругости для многослойного полупространства // Дороги и мосты. 2021. Т. 46. № 2. С. 53—74.
6. Радовский Б. С., Мерзликин А. Е. Оценка погрешностей, возникающих при расчете жестких дорожных одежд // Дороги и мосты. 2016. Т. 35. № 1. С. 59—69.
7. Актуальные подходы к моделированию напряженно-деформированного состояния жестких дорожных одежд от статических и динамических нагрузок / Е. Н. Симчук, Г. Ф. Кадыров, М. Ю. Горский, Д. В. Медведев, А. В. Стрельцов // Дороги и мосты. 2025. Т. 53. № 1. С. 55—71. DOI: 10.70991/1815-896X-2025-1-53-55-71.
8. Использование приближенного аналитического решения смешанной задачи теории упругости и теории пластичности грунта для оценки устойчивости нагруженных откосов / А. Н. Богомолов, О. А. Богомолова, В. В. Подтелков и др. // Интернет-вестн. ВолгГАСУ. 2015. № 3(39). С. 3.
9. Asha M. N., Suku L., Babu G. L. S. Shakedown analysis of granular sub-base behaviour // Geotechnical and Geological Engineering. 2025. Vol. 43. Art. no. 128.
10. Anu J., Murali K. J., Robinson R. G. Mechanical response of cement-stabilized pond ash during repeated loading based on shakedown concept. // International Journal of Geomechanics. 2024. Vol. 24. Art. no. 04024010. DOI: 10.1061/IJGNALGMENG-7516.

11. *Connolly D. P., Yu H. S.* A shakedown limit calculation method for geogrid reinforced soils under moving loads // *Geotextiles and Geomembranes*. 2021. Vol. 49. Pp. 688—696. DOI: 10.1016/j.geotextmem.2020.11.009.
12. *Wang J., Yu H. S.* Shakedown analysis and its application in pavement and railway engineering // *Computers and Geotechnics*. 2021. Vol. 138. Art. no. 104281. DOI: 10.1016/j.compgeo.2021.104281.
13. The application of the principles of the theory of shakedown to the calculation of pavement layers of granular materials in shear / A. Aleksandrov et al. // *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 239(1). Art. no. 05019.
14. *Pérez-González E., Bilodeau J.-P.* An optimized approach to multistage permanent deformation testing of granular materials // *Materials*. 2024. Vol. 17. Art. no. 3384. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma17143384>.
15. *Pérez-González E. L., Bilodeau J.-P., Doré G.* Analysis model for permanent deformation in granular materials under the action of superheavy vehicles // *Transportation Geotechnics*. 2021. Vol. 28. Art. no. 100536. DOI: 10.1016/j.trgeo.2021.100536.
16. *Pérez-González E. L., Bilodeau J.-P., Doré G.* Plastic strain rate in granular materials as a function of stress history: a probabilistic approach for the PBD model // *International Journal of Pavement Engineering*. 2022. Vol. 24(2). Pp. 1—12 DOI: 10.1080/10298436.2022.2078974.
17. *Albayati A.* A review of rutting in asphalt concrete pavement // *Open Engineering*. 2023. Vol. 13. Art. no. 20220463. DOI: 10.1515/eng-2022-0463.
18. *Hoang L. N., Le T. H.* Effect of aggregate gradation on rutting of asphalt concrete by sing a wheel tracking device in Vietnam // *Journal of the Mechanical Behavior of Materials*. 2018. Vol. 27(5-6). Art. no. 20182007. DOI: 10.1515/jmbm-2018-2007.
19. Determining the contribution of different structural layers of asphalt pavement system to rutting using transverse profile analysis / S. Hussan et al. // *American Journal of Civil Engineering and Architecture*. 2013. Vol. 1. No. 6. Pp. 174—180. DOI: 10.12691/ajcea-1-6-7.
20. State-of-the-art review on permanent deformation characterization of asphalt concrete pavements / R. Jomblat et. al. // *Sustainability*. 2023. Vol. 15. No. 2. Art. no. 1166. DOI: 10.3390/su15021166.
21. *Thiessen M., Shalaby A., Kavanagh L.* Strength testing of in-service asphalt pavements in Manitoba and correlation to rutting // *Proceedings of the Canadian Technical Asphalt Association*. 2000. Vol. 45. Pp. 203—227.
22. Конструирование и расчет нежестких дорожных одежд / Под ред. Н. Н. Иванова. М. : Транспорт, 1973. 328 с.
23. *Carlos D. M., Pinho-Lopes M., Lopes M. L.* Stress-strain response of sand reinforced with a geocomposite // *Proceedings of the 11th International Conference on Geosynthetics*. 2018. Pp. 1091—1098.
24. Soil-geosynthetic interaction under triaxial conditions: shear strength increase and influence of the specimen dimensions / R. Anjos, D. M. Carlos, S. Gouveia et al. // *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*. 2023. Vol. 9. Art. no. 83. DOI: 10.1007/s40891-023-00502-6.

© Александров А. С., Долгих Г. В., Пролыгин А. С., 2026

Поступила в редакцию
17.01.2026

Ссылка для цитирования:

Александров А. С., Долгих Г. В., Пролыгин А. С. Учет концепции кажущегося сцепления в расчете дорожной одежды по сопротивлению сдвигу // *Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура*. 2026. Вып. 1(102). С. 99—111. DOI: 10.35211/18154360_2026_1_99.

Об авторах:

Александров Анатолий Сергеевич — канд. техн. наук, доц., доц. каф. строительства и эксплуатации дорог, Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ). Российская Федерация, 644080, г. Омск, пр. Мира, 5; aleksandrov00@mail.ru

Долгих Геннадий Владимирович — канд. техн. наук, доц., зав. каф. строительства и эксплуатации дорог, Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ). Российская Федерация, 644080, г. Омск, пр. Мира, 5; dolgikh-gv@yandex.ru

Пролыгин Александр Сергеевич — преподаватель каф. строительства и эксплуатации дорог, Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ). Российская Федерация, 644080, г. Омск, пр. Мира, 5; alexandrprolygin@mail.ru

Anatoly S. Aleksandrov, Gennady V. Dolgikh, Aleksandr S. Prolygin

Siberian State Automobile and Highway University

APPLICATION OF THE APPARENT COHESION CONCEPT TO THE SHEAR STRENGTH CALCULATION OF FLEXIBLE PAVEMENT SUBGRADE

As a result of the analysis of the requirements of ODN 218.046—01 and GOST R 71404—2024, it was established that the regulatory calculation methods use two different approaches to quantify the performance of the structure in the contact zone of the road pavement layers when calculating shear resistance. The method described in ODN 218.046—01 is based on the concept of apparent cohesion that occurs when a separating layer of geosynthetic material or reinforced layers is installed, the effect of which is modeled as an increase of cohesion between the soil and the reinforcing element. The modern approach, presented in GOST R 71404—2024, uses a different hypothesis which, in our opinion, leads to incorrect modeling of shear resistance. The authors have demonstrated the validity of the judgments in ODN 218.046—01 and the erroneousness of the provisions in GOST R 71404—2024.

Key words: shear resistance, apparent adhesion, geosynthetic material.

For citation:

Aleksandrov A. S., Dolgikh G. V., Prolygin A. S. [Application of the apparent cohesion concept to the shear strength calculation of flexible pavement subgrade]. *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], 2026, iss. 1, pp. 99—111. DOI: 10.35211/18154360_2026_1_99.

About authors:

Anatoly S. Aleksandrov — Candidate of Engineering Sciences, Siberian State Automobile and Highway University (SibADI). 5, Prospect Mira, Omsk, 644080, Russian Federation; alexandrov00@mail.ru; Scopus ID: 57191531014

Gennady V. Dolgikh — Candidate of Engineering Sciences, Docent, Siberian State Automobile and Highway University (SibADI). 5, Prospect Mira, Omsk, 644080, Russian Federation; dolgikh-gv@yandex.ru; Scopus ID: 57199391542

Aleksandr S. Prolygin — Lecturer, Siberian State Automobile and Highway University (SibADI). 5, Prospect Mira, Omsk, 644080, Russian Federation; aleksan-drprolygin@mail.ru; Scopus ID: 57222243670