

УДК 691

МЕТОДИКА РАСЧЁТА ДОРОЖНЫХ ОДЕЖД С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
ГЕОСИНТЕТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

С. И. Сушков¹, Л. В. Болотских², Т. В. Каратаева²

¹ФГБОУ ВО «Воронежский государственный
лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова»

²ФГБОУ ВО «Воронежский государственный
технический университет»

E-mail: s.i.sushkov@mail.ru

В настоящее время в дорожном строительстве активно применяются объёмные георешетки. Объёмная георешетка – это пакет из полимерных лент, скрепленных между собой посредством сварных швов таким образом, что при растяжении в поперечном направлении он образует сотовую структуру. Ее ячейки могут быть заполнены различными дискретными материалами. В дорожной одежде, например, такая конструкция работает как слой повышенной несущей способности. Однако в настоящее время не существует единого метода расчета, который охватил бы полный диапазон применения георешеток в строительстве дорожных одежд. Из существующих методов расчета одежд с объёмным армированием можно выделить два.

Первый метод изложен во Временных строительных нормах по применению синтетических материалов (СМ) при устройстве нежестких дорожных одежд автомобильных дорог, разработанных 26 Центральным Научно-исследовательским институтом. Второй метод разработан Ассоциацией американских инженеров, для расчета дорожных одежд, состоящих из решеток ГЕОВЕБ с зернистым заполнителем.

Согласно временным строительным нормам нежесткую дорожную одежду рассчитывают методом приведения многослойной упругой конструкции к эквивалентной двухслойной модели. Эффект упрочнения конструктивных слоев дорожной одежды при их армировании синтетическими материалами оценивают соответствующим увеличением модуля упругости. Приведенный модуль упругости E_n определяют по эмпирической зависимости, МПа:

$$E_n = K_a * E_k, \quad (1)$$

где E_k – модуль упругости неармированного слоя, МПа; K_a – коэффициент уве-

личения модуля упругости армогрунтового слоя.

Коэффициент K_a определяют по результатам штамповых испытаний фрагментов неукрепленных и укрепленных СМ дорожных одежд. По данным экспериментальных исследований, проведенных 26 ЦНИИ МО, получены численные значения коэффициента K_a для некоторых видов конструкций одежды.

Метод расчета, предлагаемый Ассоциацией американских инженеров, основан на эмпирических зависимостях и учитывает только трение заполнителя о стенки георешетки. Очевидно, что увеличение несущей способности армированного георешетками слоя в основном связано с другим физическим явлением. Поэтому перед нами была поставлена цель разработать методику расчета конструктивных слоев из зернистых материалов, армированных объемной георешеткой.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи: определить напряженно деформируемое состояние армированного слоя и разработать математическую модель расчета; провести экспериментальные исследования для проверки теоретических результатов.

Общая методика теоретических рассуждений была построена в рамках классической теории упругости, а экспериментальные исследования проводились в лабораторных условиях с реальной расчетной оболочкой. В процессе данной работы были подвергнуты сомнению справочные значения коэффициента Пуассона для зернистых материалов, используемых нами в качестве заполнителя. Фактические значения коэффициента Пуассона в изучаемой расчетной схеме определялись путем решения обратной задачи [1].

Ячейки георешетки препятствуют горизонтальной деформации заполнителя под нагрузкой. В результате осадка слоя с георешеткой уменьшается. Это послужило основой для разработки методики расчета. В реальных условиях ячейка георешетки в плане имеет неправильную геометрическую форму (рис. 1), напоминающую ромб.

В случае, когда внешнее вертикальное давление распределяется на несколько рядом расположенных ячеек, то стенки смежных ячеек, по крайней мере в центре нагруженной области, не испытывают одностороннего бокового давления и работают только на растяжение. Это дает основание предположить, что в первом приближении в качестве расчетной схемы реальной ячейки может быть принята цилиндрическая оболочка равного с ячейкой объема и равной высоты, заполненная тем же материалом и обеспечивающая такую же величину осадки под нагрузкой, как и реальная конструкция (рис. 2).

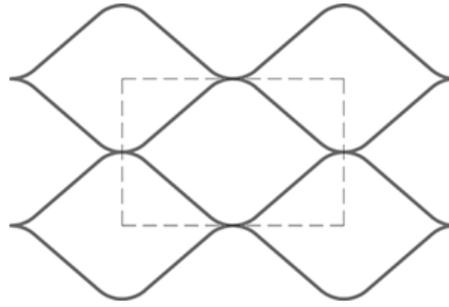
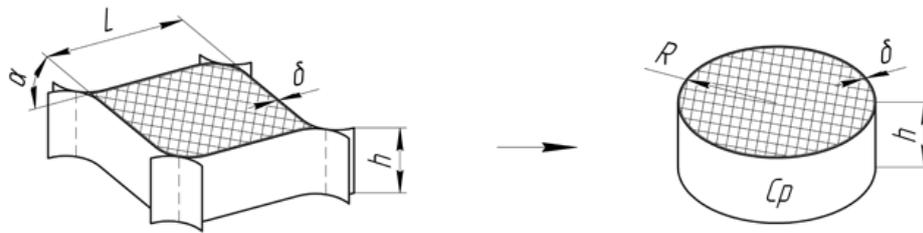


Рисунок 1 – Ячейка георешетки



h – высота ячейки; L – размер ячейки; α – угол раскрытия ячейки; δ – толщина стенки; R – «приведенный» радиус ячейки; C_p – эквивалент модуля упругости цилиндрической оболочки

Рисунок 2 – Переход от реальной ячейки к расчетной схеме (V ячейки = V цилиндра)

Выбранная расчетная схема позволяет достаточно просто рассчитать напряженно-деформированное состояние армированного слоя и установить все необходимые соотношения эквивалентности математической модели и реальной конструкции.

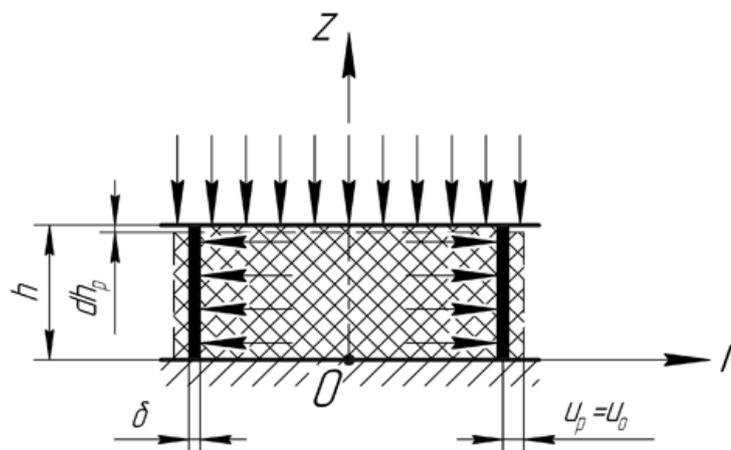
Рассмотрим задачу плоской деформации идеально-упругого, однородного и изотропного цилиндра, заключенного в расчетную оболочку и установленно-го на бесконечно жестком идеально гладком основании (рис. 3).

Вычислим осадку нагруженного слоя dh_p . Радиальная деформация массива заполнителя U_p складывается из деформации заполнителя U_q под действием вертикальной нагрузки q и радиальной деформации U_{q_p} от действия реакции оболочки q_p .

Условие равенства радиальных перемещений оболочки и заполнителя позволяет определить реакцию оболочки q_p на давление грунта:

$$q_p = \frac{\mu \cdot q}{E \cdot R / C_p \cdot \delta + 1 - \mu}, \quad (2)$$

где μ – коэффициент Пуассона; E – модуль упругости заполнителя.



q – внешняя нагрузка; q_p – реакция оболочки; dh_p – осадка армированного слоя; U_p – радиальная деформация армированного массива; U_o – радиальная деформация оболочки

Рисунок 3 – Схема деформирования расчетной оболочки

Следует отметить, что эта величина в зависимости от свойств грунта и георешетки может меняться в пределах от нуля до величины внешней нагрузки q . Наибольшего значения она достигает в жесткой оболочке, заполненной слабым водонасыщенным грунтом ($q = 0,5$). Зная реакцию оболочки q_p , можно определить осадку dh_p . Она складывается из вертикального перемещения заполнителя dh_q под действием внешней нагрузки q и вертикального перемещения массива dh_{q_p} от действия реактивного усилия q_p .

Отношение величины осадки неармированного массива заполнителя dh_q к осадке слоя с георешеткой dh_p назовем эффектом армирования и обозначим K_α :

$$K_\alpha = \frac{dh_q}{dh_p} = \frac{1}{1 - \frac{E_R \mu^2}{c_p \delta + 1 - \mu}} \quad (3)$$

Из (3) видно, что эта величина растет: при увеличении коэффициента Пуассона; при уменьшении модуля упругости материала заполнителя; при уменьшении размера ячейки; при увеличении жесткости материала решетки.

По существу K_α является коэффициентом увеличения модуля упругости армированного слоя и на практике может быть использован для вычисления эффективного модуля упругости $E_{эф}$, отражающего совместную работу рассматриваемого композита грунт – георешетка.

Величина осадки основания под нагрузкой с помощью эффективного мо-

дуля упругости $E_{эф}$ вычисляется по формуле:

$$dh_p = \frac{q \cdot h}{E_{эф}}, \quad (4)$$

$$E_{эф} = E \cdot K_a. \quad (5)$$

С помощью формулы (5) при известной величине эффекта армирования K_a можно рассчитать конструкцию дорожной одежды, армированной георешеткой, с использованием действующего норматива ОДН 218.046.

Величина эффекта армирования K_a зависит от физико-механических свойств заполнителя (E, μ) и характеристик георешетки (C_p, L, α, R и δ), но не зависит от толщины армированного слоя.

Величины R, δ, E, μ либо заранее известны проектировщику, либо задаются им. Величину C_p можно получить из опыта по определению эффекта армирования K_a , дважды реализовав в лабораторных условиях ситуацию, соответствующую граничным условиям (6).

$$\begin{aligned} \sigma_z = q; \tau_{zr} = 0; r \geq 0; z = h; \\ w = 0; \tau_{zr} = 0; r \geq 0; z = 0. \end{aligned} \quad (6)$$

Первый опыт ставится с реальной решеткой. В нем определяется осадка армированного массива (dh_p). Второй – для измерения осадки материала заполнителя (dh_q) без решетки.

В условиях равномерной осадки нагруженного слоя исключается влияние подстилающего и вышележащих слоев, трение заполнителя о георешетку и все краевые эффекты. В этих идеальных условиях величину C_p по экспериментально найденному эффекту армирования:

$$C_p = \frac{E \cdot R \cdot (K_a^{ЭК} - 1)}{\delta \cdot [\mu^2 \cdot K_a^{ЭК} - (K_a^{ЭК} - 1) \cdot (1 - \mu^2)]}, \quad (7)$$

где C_p – является эквивалентом модуля упругости цилиндрической оболочки, которой при расчетах заменяется ячейка реальной георешетки. На этом основании можно предположить, что C_p не зависит или, по крайней мере, слабо зависит от модуля упругости (E) и коэффициента Пуассона (μ) заполнителя. Поэтому C_p можно назвать постоянной характеристикой георешетки, которая зависит

только от физико-механических свойств самой решетки. Однако данное положение требует экспериментальной проверки [2].

Максимально возможный эффект армирования дорожных одежд георешетками определяется соотношением:

$$K_a < \frac{1-\mu}{1-\mu-\mu^2}. \quad (8)$$

По (8) на рисунке 4 построена зависимость предельного эффекта армирования K_a от величины коэффициента Пуассона заполнителя. Видно, что эффект армирования при увеличении коэффициента Пуассона возрастает. Так, например, для слабых водонасыщенных грунтов максимальный эффект армирования может достигать 100 %, что равносильно двукратному увеличению модуля упругости слоя при его усилении георешетками.

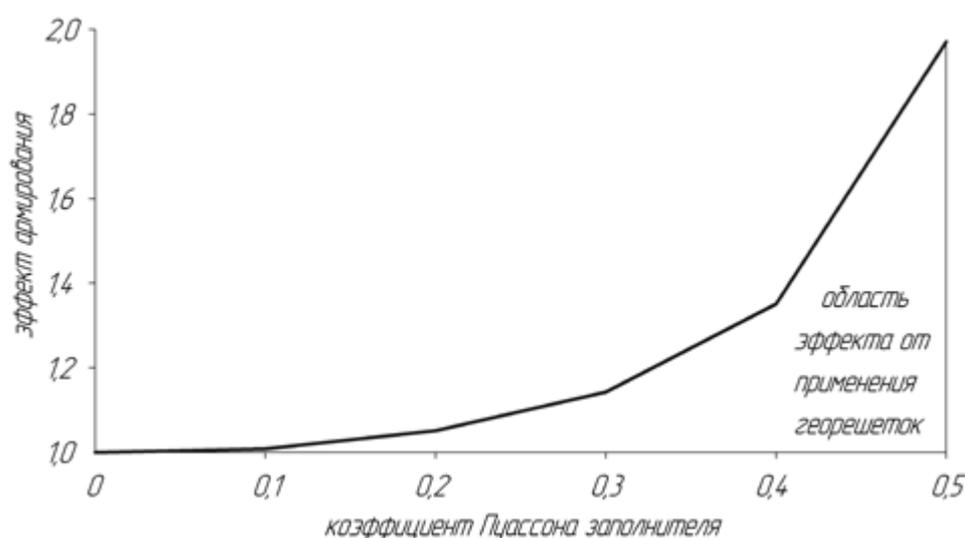


Рисунок 4 – Зависимость эффекта армирования от коэффициента Пуассона

Представленная на рисунке 4 область предельного эффекта армирования соответствует случаю, когда оболочка изготовлена из недеформируемого материала и установлена на достаточно жесткое неподвижное основание. Данное требование мы можем создать в лабораторных условиях, используя в качестве оболочки стальную цилиндрическую форму, установленную на неподвижную плиту пресса. Для подтверждения теоретических предпосылок был поставлен эксперимент. В качестве оболочки был взят стальной цилиндр с внутренним диаметром 5 см., толщиной стенки 1,5 см. и высотой 12,5 см. В качестве дис-

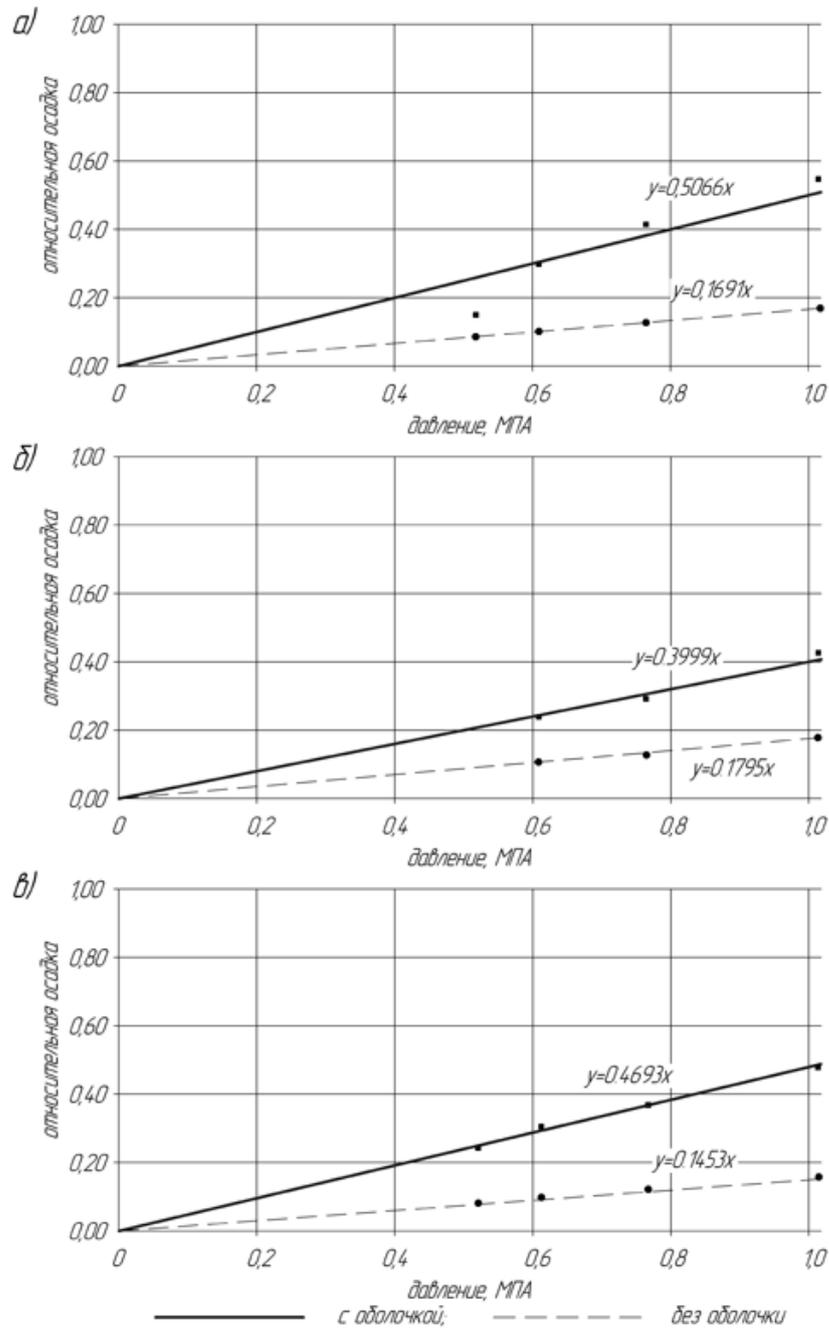
кретного заполнителя использовался щебень оптимального состава фракции 5-20, щебень фракции 0-10 (отсев продуктов дробления) и супесь.

При определении осадки нагрузка прикладывалась ступенями. В результате получена зависимость осадки от давления (рис. 5). Рассматривая материал заполнителя как линейно деформируемую среду на определенном интервале напряжений (закон Гука), проведена аппроксимация эксперимента и получена линейная зависимость. Как видно из рисунка 5 в условиях ограничения бокового перемещения, т. е. в случае применения оболочки, значительно снижается осадка материала, а соответственно увеличивается общий модуль упругости. Так эффект армирования для щебня фракции 5-20 составил 3,23 (223 %), для супеси – 3,00 (200 %), для щебня фракции 0-10 – 2,23 (123 %). Данные значения в несколько раз превышают ранее полученные теоретические результаты, согласно которым предельный эффект для щебня не может превышать 1,11 (11 %) (расчетное значение $\mu = 0,27$), для супеси – 1,21 (21 %) (расчетное значение $\mu = 0,35$). Для сопоставления результатов было предложено определить фактический коэффициент бокового расширения (аналогичный коэффициенту Пуассона μ) из выражения:

$$\mu_{\text{фак}} = \frac{\sqrt{K_a - 1} \cdot \sqrt{(K_a \cdot (5C_p \cdot \delta + 4E \cdot R) - C_p \cdot \delta)}}{2 \cdot \sqrt{C_p \cdot \delta \cdot K_a}} + \frac{1}{2K_a} - \frac{1}{2}. \quad (9)$$

В данной формуле все составляющие известны. Эффект армирования K_a и модуль упругости материала заполнителя E определены в ходе эксперимента, «постоянная» характеристика C_p является модулем упругости материала, из которого изготовлена оболочка. В нашем случае – это сталь. Модуль упругости по результатам испытаний составил для щебня фракции 5-20 – 216,48 МПа, щебня фракции 0-10 – 217,63 МПа, супеси – 191,22 МПа, расчетный модуль упругости стали – 206000 МПа.

Подставив данные величины в формулу (9), получили, что фактический коэффициент бокового расширения для щебня фракции 5-20 составил $\mu_{\text{фак}} = 0,556$, для щебня фракции 0-10 – $\mu_{\text{фак}} = 0,518$, для супеси – $\mu_{\text{фак}} = 0,55$. Для получения значений согласно (8) определен предельный эффект армирования. Для щебня фракции 5-20 он равен 3,29 (229 %), для фракции 0-10 – 2,26 (126 %), для супеси – 3,05 (205 %). Полученные расчетные результаты сочетаются с данными проведенного эксперимента.



а – супесь ($W = 9\%$, $KУПЛ = 0,98$); б – щебень фракции 0-10; в – щебень фракции 5-20

Рисунок 5 – Зависимость осадки от давления

Вывод: полученная математическая модель позволяет определить эффект армирования слоев дорожной одежды из зернистых материалов, тем самым оценить вклад георешеток в увеличении модуля упругости армированного слоя. Проведенные лабораторные исследования показали сходимость с теоретическими данными и позволили экспериментально определить «фактический» коэффициент Пуассона для реальных материалов. Полученные значения коэффи-

циентов существенно отличаются от справочных данных. Это объясняется армирующим эффектом, который возникает в зернистом материале-заполнителе в условиях ограниченного бокового перемещения.

Библиографический список

1 Бурмистрова, О. Н. Обоснование расчетных схем нежестких дорожных одежд, армированных геосинтетическими материалами. [Текст] / О. Н. Бурмистрова, М. А. Воронина – М. : Научно-информационный журнал «Системы. Методы. Технологии». БрГТУ, 2012. – №1 (13) – С. 93-97.

2 Бургонутдинов, А. М. Усовершенствование методики определения прочности дорожной конструкции [Текст] / А. М. Бургонутдинов, О. Н. Бурмистрова, С. И. Сушков, И. Н. Кручинин // Лесотехнический журнал. – 2016. – Т. 6, № 3. – С. 65-73.