

УДК 638.383

Обоснование расчетных схем нежестких дорожных одежд, армированных геосинтетическими материалами

О.Н. Бурмистрова¹, М.А. Воронина¹

¹Ухтинский государственный университет. Первомайская 13, Ухта, Республика Коми, Россия
Статья поступила 23.12.2011, принята 15.02.2012

В статье рассматриваются отличительные особенности строительства лесных дорог Республики Коми. Обоснована необходимость использования усовершенствованных и качественных дорожно-строительных материалов как основы новых надежных и экономичных конструктивно-технологических решений. Определено, что при проектировании лесовозных автомобильных дорог важно установить минимальную требуемую толщину дорожной одежды, чтобы ограничить глубину развития колеи некоторой величиной, допустимой по условию проходимости расчетных автомобилей. В связи с этим расчетная схема таких дорожных одежд должна учитывать возможность значительного накопления остаточных деформаций в подстилающем грунте основания насыпного слоя. Проанализированы экспериментальные исследования армированных геосинтетическими материалами дорожных одежд лесовозных автомобильных дорог, где минимально необходимая толщина насыпного слоя назначается из условия проходимости, и допускается сравнительно большая колея, которые позволили выявить схемы деформирования таких конструкций. Выявлена важная особенность лесовозных автомобильных дорог, возводимых для кратковременного функционирования (ветки, усы), – конструкции дорожных одежд назначаются, главным образом, из условий обеспечения проезда транспортных средств. В связи с этим рассмотрена работа конструкций в условиях одноштампового и двухштампового нагружения. Приведена расчетная схема дорожных одежд, которая позволяет учитывать возможность значительного накопления остаточных деформаций в подстилающем грунте основания насыпного слоя. В статье приведена математическая модель, позволяющая рассчитать оптимальную толщину дорожной одежды, армированной геосинтетическими материалами. В результате рассмотрено условие равновесия слоя зернистого материала и георешетки на винклеровском (упругом) основании с шероховатой поверхностью в условиях двухштампового нагружения. Определена функция прогиба армированного слоя (положения равновесия).

Ключевые слова: математическая модель, лесовозная автомобильная дорога, геосинтетические материалы, дорожная одежда.

Substantiation of design diagrams of nonrigid road clothes reinforced by geosynthetic materials

O. N. Burmistrova^{1*}, M. A. Voronina¹

¹Ukhta State University, 13, Pervomaiskaya str., Ukhta, the Republik of Komi, Russia
Received 23.12.2011; Accepted 15.02.2012

The article discusses the distinctive features of the construction of forest roads of the Republic of Komi. The necessity of the use of advanced and high-quality road-building materials as the basis for new, reliable and cost-effective design and technological solutions. It was determined that the design of logging roads is important to establish the minimum required thickness of pavement in order to limit the depth of a rut the size permitted by the condition of the calculated cross-country vehicles. In this regard, the design scheme of the pavement must consider the possibility of significant accumulation of residual strain in the underlying bulk soil base layer. The experimental study of geosynthetics reinforced pavement logging roads, where the minimum required thickness of the bulk layer is appointed by the condition and the terrain allowed the relatively large track, which revealed the scheme of deformation of such structures. Spotted an important feature of logging roads being built for short-term operation (branch, mustache), - construction of road pavements shall be appointed mainly from the conditions for passage of vehicles. In connection with this work is discussed in terms of structures and 1-stamps and 2-stamps loading. Shows the calculated scheme of pavement, which allows to consider the possibility of significant accumulation of residual strain in the underlying bulk soil base layer. The article presents a mathematical model that calculates the optimum thickness of the pavement, reinforced with geosynthetic materials. As a result, the equilibrium condition is considered a layer of granular material and geogrid in Winkler (elastic) based on a rough surface in 2-stamps loading. Function is defined trough reinforced layer (equilibrium).

Keywords: mathematical model, forest road, geosynthetic materials, road clothes.

Обследование состояния сети лесовозных дорог с диагностикой состояния дорожного полотна, мостов и других элементов дороги в Республике Коми никогда не проводилось. В 2005-2007 гг. государственным учреждением «Территориальный фонд информации по природным ресурсам и охране окружающей среды Рес-

публики Коми» было выполнено камеральное (путем опроса лесозаготовителей, по космическим снимкам и т. п.) изучение и картографирование состояния сети лесовозных дорог, в результате которого было выявлено следующее: – в настоящий момент в основном эксплуатируются грунтовые лесовозные дороги, оставшиеся от лесозаготовительных предприятий советского периода;

* E-mail address: - Oburmistrova@ugtu.net

– лесозаготовки носят ярко выраженный сезонный характер, а летняя вывозка леса в значительной мере зависит от погодных условий, влияющих на состояние грунтовых лесовозных дорог;

– лесной фонд вблизи дорог круглогодичного действия и периодически действующих летних лесовозных дорог в значительной степени истощен рубками прошлых лет [1].

Цель работы. Необходимость совершенствования и развития сети автомобильных дорог Республики Коми ставит ряд стратегических задач, среди которых – использование усовершенствованных и качественных дорожно-строительных материалов как основы новых, надежных и экономичных конструктивно-технологических решений [2].

Специфика этих материалов требует дифференцированной по областям применения регламентации большого комплекса показателей свойств, зачастую противоречиво связанных друг с другом (улучшение одних ведет к ухудшению других), изменяющихся в процессе эксплуатации и определяемых, к тому же, по различным, не в полной мере согласованным методикам.

Так, отличительной особенностью лесовозных автомобильных дорог является то, что конструкции до-

рожных одежд назначаются, главным образом, из условий обеспечения проезда транспортных средств. При их проектировании важно установить минимальную требуемую толщину дорожной одежды, чтобы ограничить глубину развития колеи некоторой величиной, допустимой по условию проходимости расчетных автомобилей. В связи с этим расчетная схема таких дорожных одежд должна учитывать возможность значительного накопления остаточных деформаций в подстилающем грунте основания насыпного слоя.

Решаемые задачи. Особенностью лесовозных автомобильных дорог, возводимых для кратковременного функционирования (ветки, усы), является то, что конструкции дорожных одежд назначаются, главным образом, из условий обеспечения проезда транспортных средств [3]. Экспериментальные исследования армированных геосинтетическими материалами дорожных одежд лесовозных автомобильных дорог, где минимально необходимая толщина насыпного слоя назначается из условия проходимости и допускается сравнительно большая колея, позволили выявить схемы деформирования таких конструкций (рис. 1, 2)



Рис. 1. Схема деформирования армированной дорожной одежды.

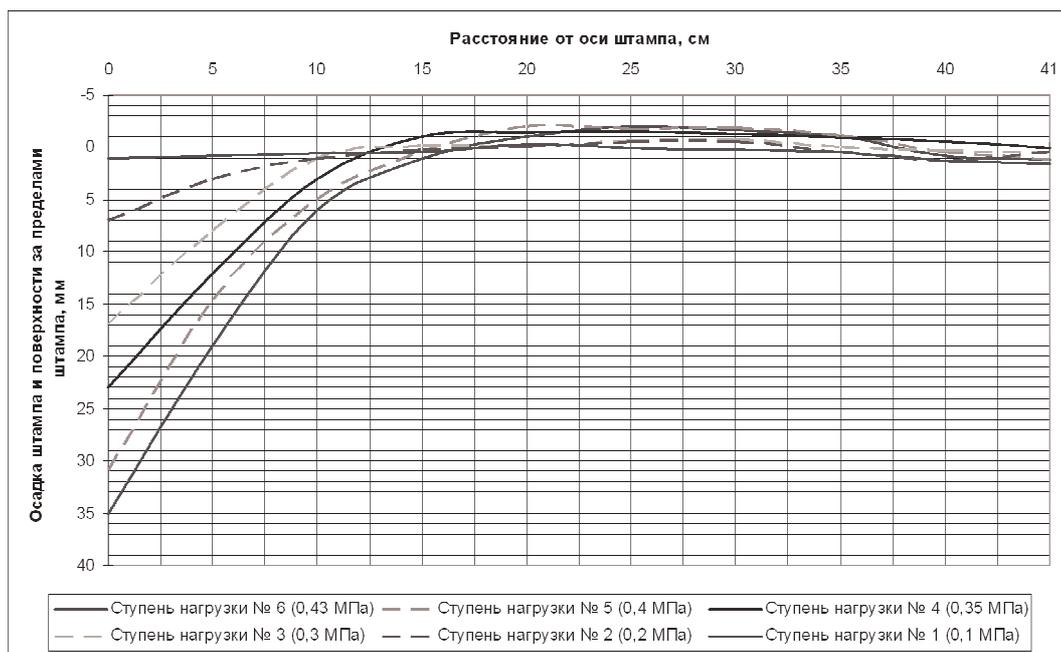


Рис. 2. Схема деформирования геосинтетического материала за пределами штампа по результатам экспериментальных исследований.

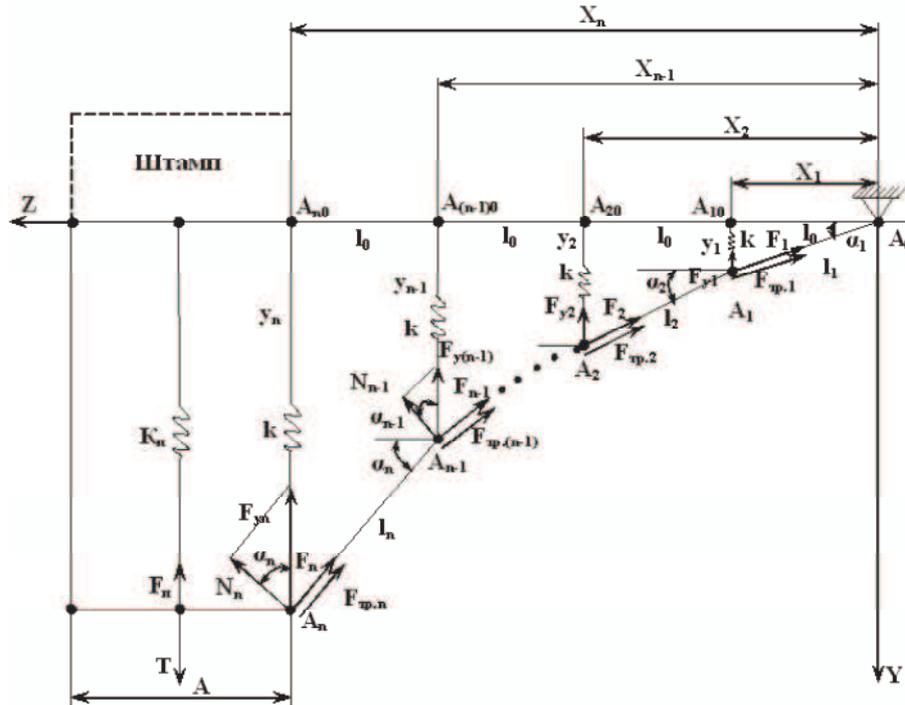


Рис. 3. Расчетная схема условия равновесия слоя зернистого материала и георешетки на винклеровском (упругом) основании с шероховатой поверхностью в условиях двухштампового нагружения.

Проведенные эксперименты показали, что работа конструкций в условиях одноштампового и двухштампового нагружения отличается.

По одноштамповой схеме несущая способность армированной конструкции составляет всего $3,4 \text{ кгс/см}^2$, но при проезде транспортного средства предельное состояние конструкции не достигается даже при многократных проездах техники. Это объясняется тем, что, благодаря георешетке, в работу включается большая площадь основания – в «колеиной» зоне и между колесами соседних осей. После 30 проходов техники конструкция, армированная георешеткой, остается работоспособной и имеет удовлетворительные транспортно-эксплуатационные показатели.

При двухштамповой схеме нагружения, моделирующей одновременное воздействие на дорожную одежду обоих колес оси автомобиля, несущая способность армированной конструкции значительно возрастает. Объясняется данный факт возникновением так называемого анкерного эффекта, когда включается в работу часть геосинтетического материала в межколеиной зоне, то есть в зоне защемления геосинтетики между колесами автомобиля.

Таким образом, для учета влияния георешеток на напряженно-деформированное состояние дорожных одежд и подстилающего грунтового основания, работающих в стадии накопления значительных остаточных деформаций, рассматривается условие равновесия слоя зернистого материала и георешетки на винклеровском (упругом) основании с шероховатой поверхностью в условиях двухштампового нагружения (рис. 3). Задача состоит в определении функции прогиба армированного слоя (положения равновесия).

Математическое моделирование. Использование в расчетной схеме винклеровского основания обосновано соображениями, указанными во многих трудах. В работах [4] сделаны выводы, что в большинстве случаев кривые осадок поверхности грунтов, построенные на основе модели линейно-деформированного полупространства, дают сходимость с результатами экспериментов лишь при малой влажности грунта, что характерно для летнего периода и для грунтов, незначительно меняющих влажность в течение года. При влажности грунта $W > 0,75W_l$, что наиболее характерно для расчетного периода, распределительная способность грунта невелика, и поэтому модель Винклера наиболее точно отражает деформации грунта. Модель линейно-деформируемого полупространства может быть использована при благоприятных грунтовых условиях в III, IV и V дорожно-климатических зонах.

Предпосылки математической модели:

1. Георешетка представлена механической системой, состоящей из n продольных и m поперечных упругих стержней, лежащих на шероховатой упругой поверхности и растягиваемых силой T , приложенной со стороны штампа. Соединение стержней шарнирное, без трения.

2. До нагружения штампом с силой T стержни занимают горизонтальное положение. Длина стержней до деформации равна l_0 . Коэффициент трения скольжения стержней по шероховатой поверхности равен f . Параметр относительной жесткости стержней равен $c = E_{cm}F / l_0$, где E_{cm} – модуль упругости геосинтетического материала, F – площадь поперечного сечения стержня. Упругая поверхность под георешеткой моделируется N пружинами с коэффициентами жесткости k ,

а упругая поверхность под штампом имеет коэффициент жесткости (постели) $K_{\text{п}}$.

3. Допускается, что шарниры A_1, A_2, \dots, A_n при нагружении перемещаются только по вертикали. Тогда число степеней свободы рассматриваемой механической системы равно числу стержней.

4. Рассматриваемая задача при двухштамповой схеме нагружения является симметричной, поэтому она сводится к одноштамповому нагружению.

5. В качестве обобщенных координат принимаем углы $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$, которые образуют стержни с осью x после нагружения системы силой T :

$$q_1 = \alpha_1, q_2 = \alpha_2, \dots, q_s = \alpha_n. \quad (1)$$

Для определения положения равновесия механической системы, которое она займет после нагружения силой T , воспользуемся принципом возможных перемещений в обобщенных силах. Для этого следует составить выражение возможной работы и приравнять ее нулю:

$$Q_1 \cdot \delta q_1 + Q_2 \cdot \delta q_2 + \dots + Q_s \cdot \delta q_n = 0, \quad (2)$$

где Q_1, Q_2, \dots, Q_n – обобщенные силы, соответствующие выбранным обобщенным координатам;

$\delta q_1, \delta q_2, \dots, \delta q_n$ – вариации обобщенных координат.

Поскольку вариации обобщенных координат произвольны и не зависят друг от друга, равенство (2) выполняется при условии:

$$Q_1 = 0, Q_2 = 0, \dots, Q_n = 0. \quad (3)$$

Выразив каждую из обобщенных сил Q_j через обобщенные координаты $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$, получим систему N нелинейных алгебраических уравнений:

$$\left. \begin{aligned} Q_1(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n) &= 0 \\ Q_2(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n) &= 0 \\ Q_n(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n) &= 0 \end{aligned} \right\}. \quad (4)$$

Таким образом, задача заключается в нахождении обобщенных сил как коэффициентов при вариации обобщенных координат в выражении возможной работы и решении системы уравнений (4).

К каждому из шарниров A_1, A_2, \dots, A_n (рис. 3) приложены силы: F_1, F_2, \dots, F_n со стороны растянутых стержней, силы упругости $F_{y1}, F_{y2}, \dots, F_{yn}$, силы трения $F_{mp1}, F_{mp2}, \dots, F_{mpn}$. Кроме того, будет приложена сила упругости грунта $F_n = k_n \cdot y_n$ (под штампом). К участку сетки под штампом приложена сила T .

Силы, растягивающие стержни, равны:

$$F_1 = c \cdot \lambda_1, ; F_2 = c \cdot \lambda_2, \dots, F_n = c \cdot \lambda_n ;$$

где $\lambda_1 = l_1 - l_0 ; \lambda_2 = l_2 - l_0, \dots, \lambda_n = l_n - l_0$ – удлинения стержней;

l_1, l_2, \dots, l_n – длина стержней после деформации.

Силы упругости пружин:

$$F_{y1} = k \cdot y_1, F_{y2} = k \cdot y_2, \dots, F_{yn} = k \cdot y_{1n} ;$$

где y_1, y_2, \dots, y_n – ординаты точек A_1, A_2, \dots, A_n , равные удлинениям пружин.

Силы трения скольжения определяются по закону Кулона:

$$\begin{aligned} F_{mp1} &= f \cdot F_{y1} \cdot \cos \alpha_1 ; F_{mp2} = f \cdot F_{y2} \cdot \cos \alpha_2, \dots, \\ F_{mpn} &= f \cdot F_{yn} \cdot \cos \alpha_n . \end{aligned}$$

Реакция грунта под штампом: $F_n = k_n \cdot y_n$.

Выразим координаты точек приложения сил A_1, A_2, \dots, A_n через обобщенные координаты:

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= l_0 ; y_1 = l_0 \cdot \operatorname{tg} \alpha_1 \\ x_2 &= 2 \cdot l_0 ; y_2 = l_0 \cdot (\operatorname{tg} \alpha_1 + \operatorname{tg} \alpha_2) \\ x_n &= n \cdot l_0 ; y_n = l_0 \cdot (\operatorname{tg} \alpha_1 + \operatorname{tg} \alpha_2 + \dots + \operatorname{tg} \alpha_{n-1}) \end{aligned} \right\}. \quad (5)$$

Найдем удлинение стержней:

$$\left. \begin{aligned} \lambda_1 &= l_0 \cdot \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha_1} - l_0 \\ \lambda_2 &= l_0 \cdot \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha_2} - l_0 \\ \lambda_n &= l_0 \cdot \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha_n} - l_0 \end{aligned} \right\}. \quad (6)$$

Тогда силы, растягивающие стержни, будут равны:

$$\left. \begin{aligned} F_1 &= cl_0 \left(\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha_1} - 1 \right) = cl_0 \left(\frac{1}{\cos \alpha_1} - 1 \right) \\ F_2 &= cl_0 \left(\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha_2} - 1 \right) = cl_0 \left(\frac{1}{\cos \alpha_2} - 1 \right) \\ F_n &= cl_0 \left(\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha_n} - 1 \right) = cl_0 \left(\frac{1}{\cos \alpha_n} - 1 \right) \end{aligned} \right\}. \quad (7)$$

Определим силы упругости пружины:

$$\left. \begin{aligned} F_{y1} &= kl_0 \operatorname{tg} \alpha_1 \\ F_{y2} &= kl_0 (\operatorname{tg} \alpha_1 + \operatorname{tg} \alpha_2) \\ F_{yn} &= kl_0 (\operatorname{tg} \alpha_1 + \operatorname{tg} \alpha_2 + \dots + \operatorname{tg} \alpha_n) \end{aligned} \right\}. \quad (8)$$

Отсюда силы трения скольжения:

$$\left. \begin{aligned} F_{mp1} &= fkl_0 \operatorname{tg} \alpha_1 \cos \alpha_1 \\ F_{mp2} &= fkl_0 (\operatorname{tg} \alpha_1 + \operatorname{tg} \alpha_2) \cos \alpha_2 \\ F_{mpn} &= fkl_0 (\operatorname{tg} \alpha_1 + \operatorname{tg} \alpha_2 + \dots + \operatorname{tg} \alpha_n) \cos \alpha_n \end{aligned} \right\}. \quad (9)$$

Сообщим рассматриваемой механической системе возможные перемещения: $\delta \alpha_1, \delta \alpha_2, \dots, \delta \alpha_n$, вычислим

возможную работу всех приложенных к ней сил и приравняем ее к нулю:

$$\begin{aligned}
 & T\delta y_n - F_n\delta y_n - F_{y1}\delta y_1 - F_{y2}\delta y_2 - \dots - \\
 & - F_{yn}\delta y_n - \dots - F_1\delta\lambda_1 - F_2\delta\lambda_2 - \dots - F_n\delta\lambda_n - \\
 & - F_{mp1} \cdot \cos \alpha_1 \cdot \delta x_1 - F_{mp2} \cdot \cos \alpha_2 \cdot \delta x_2 - \dots - \\
 & - F_{mpn} \cdot \cos \alpha_n \cdot \delta x_n - F_{mp1} \cdot \sin \alpha_1 \cdot \delta y_1 - \\
 & - F_{mp2} \cdot \sin \alpha_2 \cdot \delta y_2 - \dots - F_{mpn} \cdot \sin \alpha_n \cdot \delta y_n = 0
 \end{aligned} \quad (10)$$

$$\left. \begin{aligned}
 \delta x_1 &= \frac{dx_1}{d\alpha_1} \delta\alpha_1 = 0 \\
 \delta y_1 &= \frac{dy_1}{d\alpha_1} \delta\alpha_1 = l_0 \frac{\delta\alpha_1}{\cos^2 \alpha_1} \\
 \delta x_2 &= \frac{dx_1}{d\alpha_1} \delta\alpha_1 + \frac{dx_2}{d\alpha_2} \delta\alpha_2 = 0 \\
 \delta y_2 &= \frac{dy_1}{d\alpha_1} \delta\alpha_1 + \frac{dy_2}{d\alpha_2} \delta\alpha_2 = l_0 \frac{\delta\alpha_1}{\cos^2 \alpha_1} + l_0 \frac{\delta\alpha_2}{\cos^2 \alpha_2} \\
 \delta x_n &= 0 \\
 \delta y_n &= l_0 \left(\frac{\delta\alpha_1}{\cos^2 \alpha_1} + \frac{\delta\alpha_2}{\cos^2 \alpha_2} + \dots + \frac{\delta\alpha_n}{\cos^2 \alpha_n} \right)
 \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Найдем вариации удлинения стержней:

$$\left. \begin{aligned}
 \delta\lambda_1 &= \frac{d\lambda_1}{d\alpha_1} \delta\alpha_1 = l_0 \frac{tg\alpha_1 \delta\alpha_1}{\sqrt{1+tg^2\alpha_1} \cos^2 \alpha_1} = l_0 \frac{\sin\alpha_1}{\cos^2 \alpha_1} \delta\alpha_1 \\
 \delta\lambda_2 &= \frac{d\lambda_2}{d\alpha_2} \delta\alpha_2 = l_0 \frac{tg\alpha_2 \delta\alpha_2}{\sqrt{1+tg^2\alpha_2} \cos^2 \alpha_2} = l_0 \frac{\sin\alpha_2}{\cos^2 \alpha_2} \delta\alpha_2 \\
 \delta\lambda_n &= \frac{d\lambda_n}{d\alpha_n} \delta\alpha_n = l_0 \frac{tg\alpha_n \delta\alpha_n}{\sqrt{1+tg^2\alpha_n} \cos^2 \alpha_n} = l_0 \frac{\sin\alpha_n}{\cos^2 \alpha_n} \delta\alpha_n
 \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

Значения сил (7) – (9) и вариаций (11) – (12) подставим в выражение (10).

Решая систему уравнений (13) численным методом (методом Ньютона) при заданных значениях T, l_0, c, k, K_n , найдем значение углов $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$, определяющих положение равновесия системы. Зная функцию прогиба, можно рассчитать оптимальную толщину дорожной одежды, удовлетворяющей требуемым условиям.

Приравняв к нулю коэффициенты при $\delta\alpha_1, \delta\alpha_2, \dots, \delta\alpha_n$, получим n систему нелинейных трансцендентных уравнений:

$$\left. \begin{aligned}
 & T - kl_0 tg\alpha_1 - kl_0 (tg\alpha_1 + tg\alpha_2) - \dots - kl_0 (tg\alpha_1 + tg\alpha_2 + \dots + tg\alpha_n) - K_n l_0 \times \\
 & \times (tg\alpha_1 + tg\alpha_2 + \dots + tg\alpha_n) - cl_0 \left(\sqrt{1+tg^2\alpha_1} - 1 \right) \sin \alpha_1 - fkl_0 tg\alpha_1 \cos \alpha_1 \sin \alpha_1 - \\
 & fkl_0 (tg\alpha_1 + tg\alpha_2) \cos \alpha_2 \sin \alpha_2 - \dots - fkl_0 (tg\alpha_1 + tg\alpha_2 + \dots + tg\alpha_n) \cos \alpha_n \sin \alpha_n = 0 \\
 & T - kl_0 tg\alpha_1 - kl_0 (tg\alpha_1 + tg\alpha_2) - \dots - kl_0 (tg\alpha_1 + tg\alpha_2 + \dots + tg\alpha_n) - K_n l_0 \times \\
 & \times (tg\alpha_1 + tg\alpha_2 + \dots + tg\alpha_n) - cl_0 \left(\sqrt{1+tg^2\alpha_1} - 1 \right) \sin \alpha_2 - fkl_0 tg\alpha_1 \cos \alpha_1 \sin \alpha_1 - \\
 & fkl_0 (tg\alpha_1 + tg\alpha_2) \cos \alpha_2 \sin \alpha_2 - \dots - fkl_0 (tg\alpha_1 + tg\alpha_2 + \dots + tg\alpha_n) \cos \alpha_n \sin \alpha_n = 0 \\
 & T - kl_0 tg\alpha_1 - kl_0 (tg\alpha_1 + tg\alpha_2) - \dots - kl_0 (tg\alpha_1 + tg\alpha_2 + \dots + tg\alpha_n) - \\
 & - K_n l_0 (tg\alpha_1 + tg\alpha_2 + \dots + tg\alpha_n) - cl_0 \left(\sqrt{1+tg^2\alpha_1} - 1 \right) \sin \alpha_n - \\
 & - fkl_0 tg\alpha_1 \cos \alpha_n \sin \alpha_n - fkl_0 (tg\alpha_1 + tg\alpha_2) \cos \alpha_n \sin \alpha_n - \dots - \\
 & - \dots - fkl_0 (tg\alpha_1 + tg\alpha_2 + \dots + tg\alpha_n) \cos \alpha_n \sin \alpha_n = 0
 \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

Выводы.

Рассмотрено условие равновесия слоя зернистого материала и георешетки на винклеровском (упругом) основании с шероховатой поверхностью в условиях двухштампового нагружения. Определена функция прогиба

армированного слоя (положения равновесия). Георешетки придают заполнителю так называемое кажущееся сцепление порядка 150 КПа, обеспечивая дополнительную прочность при сдвиге по сравнению с природной.

Литература

References

1. Генеральная схема развития сети лесных дорог Республики Коми // Проект правительства Республики Коми. Сыктывкар, 2008. 48 с.
2. Леонович И.И. Использование геосинтетиков в дорожном строительстве // Строительство. 2003. № 1-2. С. 285-294.
3. Фомин А.П., Буданов В. Г., Пушкин В. И. Повышение качества земляного полотна путем его армирования // Совершенствование организации и технологии ремонта и содержания автомобильных дорог: сб. науч. тр. М., 1979. Вып. 26. 119 с.
4. Bathurst R.J., Jarrett P. M. Large-Scale Model Tests of Geocomposite Mattresses over Peat Subgrades, Transportation Research Record, 1988. Vol. 1188

1. Master plan for the development of forest roads network in the Republic of Komi // Proekt pravitel'stva Respubliki Komi. Syktyvkar, 2008. 48 s.
2. Leonovich I.I. The use of geosynthetics in road building // Stroitel'stvo. 2003. № 1-2. S. 285-294.
3. Fomin A.P., Budanov V.G., Pushkin V.I. Subgrade improving by means of reinforcement // Sovershenstvovaniye organizatsii i tekhnologii remonta i sodержaniya avtomobil'nykh dorog: sb. nauch. tr. M., 1979. Vyp. 26. 119 s.
4. Bathurst R.J., Jarrett P. M. Large-Scale Model Tests of Geocomposite Mattresses over Peat Subgrades, Transportation Research Record, 1988. Vol. 1188.