

goroda Khabarovska i otsenka yego dinamicheskikh i gruzopodnykh parametrov [Study of the work of pedestrian bridge structures on Prospekt 60-let Oktyabrya – stop Jubilee City of Khabarovsk and an assessment of its dynamic and load-lifting parameters]. Khabarovsk, 2014. 45 p.

11. Belutsky I.Yu., Predlozheniya po konstruktivnym resheniyam proleznogo stroyeniya nadzemnogo peshekhodnogo perekhoda cherez ul. Gogolya v g. Khabarovske [Proposals for constructive solutions of the span structure of an overground pedestrian crossing through the street. Gogol in the city of Khabarovsk]. 2003. 20 p.

12. Iovenko V.V., Izbrannyye lektsii po soprotivleniyu materialov [Selected lectures on the resistance of materials], Khabarovsk, Publishing house of the Pacific State University, 2016. 223 p.

13. Ovchinnikov I.G., Dyadchenko G.S. Peshekhodnyye mosty: konstruktsiya, stroitel'stvo, arkhitektura [Pedestrian bridges: construction, construction, architecture]. [Textbook]. Saratov, Saratov State University. tech. University, 2005. 227 p.

14. Yelovskiy R.E., Lyuzovik S.S., Kozyrev S.V. Sanatornaya na uchastke avtomobil'noy dorogi M-60 «Ussuri» Khabarovsk – Vladivostok na uchastke km 747-750 [Sanatorium on the section of the highway M-60 «Ussuri» Khabarovsk - Vladivostok on the section km 747-750]. Raschet proleznogo stroyeniya. Peshekhodnyy puteprovod. Prolezhnoye stroyeniye L=42,6m. «Rekonstruktsiya avtomobil'noy dorogi Aeroport «Knevichi» [Calculation of span structure. Pedestrian overpass. The span structure is L = 42.6 m. «Reconstruction of the highway «Airport Knevichi»]. RPA «Mostovik», 2010. 21p.

15. Belutsky I.Yu., Lapin A.V., Zhao Jian. Korobchatyye prolezhnye stroyeniya peshekhodnykh mostov s zamknutymi prostranstvami [Boxed span structures of pedestrian bridges with enclosed spaces]. Dal'nij Vostok: Problemy razvitiya arhitekturno-stroitel'nogo kompleksa [Far East: Problems of the development of the architectural and construction complex], Khabarovsk; TOGU, 2015. No 1. pp. 320 – 325.

16. Belutsky I.Yu., Lapin A.V. Osobennosti dinamicheskoy raboty prolezhnykh stroyeniy peshekhodnykh mostov. [Features of the dynamic operation of span structures of pedestrian bridges]. Dal'nij Vostok: Problemy razvitiya arhitekturno-stroitel'nogo kompleksa [Far East: Problems of the development of the architectural and construction complex], Khabarovsk; TOGU, 2015. No 1. pp. 263 – 270.

17. Lapin A.V. Aktual'nye voprosy komponovki poperechnykh secheniy prolezhnykh stroeniy peshekhodnykh mostov [Actual problems of the layout of cross sections of span structures of pedestrian bridges]. Uchenye zametki TOGU,

[Jelektronnyj resurs], 2015, vol. 6, no 2, pp. 6 – 18. URL [http://pnu.edu.ru/media/ejournal/articles-2015/TGU\\_6\\_66.pdf](http://pnu.edu.ru/media/ejournal/articles-2015/TGU_6_66.pdf).

18. Birger I.A., Panovko Ya.G. Prochnost', ustoychivost', kolebaniya. Spravochnik v trekh tomakh. [Strength, stability, vibrations. Handbook in three part.]. Moscow, Mechanical engineering, vol. 3. 1968. 567 p.

19. Smirnov A.F. Ustoychivost' i kolebaniya sooruzheniy. [Stability and oscillations of structures]. Moscow, Transzheldorizdat, 1958. 571 p.

20. Belutsky I.Yu., Zhao Jian, Yatsura V.G. Issledovaniye vliyaniya nadopornykh svyazey stalezhelezobetonnykh mostov v sisteme TNPS na parametry ikh svobodnykh kolebaniy [Investigation of the effect of pressure bonds of composite steel bridges in the TNPS system on the parameters of their free oscillations]. Vestnik Tihookeanskogo gosudarstvennogo universiteta, Khabarovsk, 2012, no 4(27), pp. 79 – 86.

### **ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ**

*Белуцкий Игорь Юрьевич (г. Хабаровск, Россия) – доктор технических наук, профессор, кафедра автомобильных дорог, ФГБОУ ВО «Тихоокеанский государственный университет» (680035, Россия, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136).*

*Belutsky Igor Yuryevich (Khabarovsk, Russia) – doctor of technical Sciences, professor, Department of Highways, FGBOU VO «Pacific State University» (680035, Russia, Khabarovsk, st. Pacific, 136).*

*Иовенко Владимир Васильевич (г. Хабаровск, Россия) – кандидат технических наук, доцент, кафедра автомобильных дорог, ФГБОУ ВО «Тихоокеанский государственный университет» (680035, Россия, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136).*

*Yovenko Vladimir Vasilievich (Khabarovsk, Russia) – candidate of technical sciences, Associate Professor, Department of Highways, FGBOU VO «Pacific State University» (680035, Russia, Khabarovsk, st. Pacific, 136).*

*Лопин Артем Васильевич (г. Хабаровск, Россия) – старший преподаватель, аспирант, кафедра автомобильных дорог, ФГБОУ ВО «Тихоокеанский государственный университет» (680035, Россия, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136, e-mail: tema\_s14@mail.ru).*

*Lapin Artem Vasilievich (Khabarovsk, Russia) – lecturer, post-graduate student, Department of Highways, FGBOU VO «Pacific State University» (680035, Russia, Khabarovsk, st. Pacific, 136, e-mail: tema\_s14@mail.ru).*

УДК 625.731.812

## **ВЛИЯНИЕ АРМИРОВАНИЯ НА ВЕЛИЧИНУ УПРУГОГО ПРОГИБА ДИСКРЕТНОГО ОСНОВАНИЯ ДОРОЖНОЙ ОДЕЖДЫ**

**С.А. Матвеев, Е.А. Мартынов, Н.Н. Литвинов**  
ФГБОУ ВО «СибАДИ», г. Омск, Россия

### **АННОТАЦИЯ**

*Активное внедрение в дорожное строительство геосинтетических материалов в качестве армирующих конструктивных элементов дорожных одежд сдерживается отсутствием научно обоснованной и экспериментально подтвержденной теории расчета дорожных одежд с армирующими слоями. В работе исследуется влияние армирования на величину упругого прогиба*

*основания из щебня и песка. Армирующая прослойка в виде плоской георешетки со стальными волокнами в полиэтиленовой оболочке уложена между слоем щебня и основанием из песка. Приведены результаты штамповых испытаний. Выявлены закономерности деформирования и получены деформационные характеристики армированной конструкции. Расчетная модель армированного слоя щебня рассматривается как многослойная плита на упругом основании, состоящая из произвольного количества жестко сцепленных между собой слоев. Нижний слой с арматурой имеет физико-механические характеристики, определяемые методом осреднения по Фойгту и существенно отличающиеся от характеристик вышележащих слоев. Песчаный подстилающий слой выполняет роль упругого основания. Данная расчетная модель применима и для случая отсутствия армирующей прослойки. При этом из расчетной схемы исключается нижний армирующий слой, а также слои, расположенные в растянутой зоне. Для расчета многослойной плиты на упругом основании использован метод Бубнова-Галеркина. Получено удовлетворительное совпадение теоретических и экспериментальных результатов. Установлен эффект армирования по прогибам.*

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** дискретное основание дорожной одежды, армирование, георешетка, эффект армирования, плита на упругом основании, прогиб.

## **ВВЕДЕНИЕ**

В автодорожном и железнодорожном строительстве все более активно используются геосинтетические материалы [1-11]. Практически ни одно крупное строительство не обходится без них. Массовое применение геосинтетических материалов в нашей стране началось с использования нетканых материалов, которые использовались в качестве дренирующих и разделяющих слоев, а также трещинопрерывающих прослоек. Использование данных материалов в качестве армирующих не нашло соответствующего научного и практического обоснования. Для укрепления откосов применяются различные конструкции из геосинтетических материалов в виде прослоек и обойм, заполненных зернистыми материалами. С середины 90-х гг. XX в. началось массовое строительство опытных участков с армированными основаниями и покрытиями дорожных одежд. В качестве материала для армирования использовали геосетки и георешетки.

Опытное строительство и сопутствующие научные исследования позволили определить направления для развития теоретических расчетов и область рационального применения материалов, номенклатура которых в настоящее время достаточно широка и продолжает расширяться. «Однако существующие нормативные документы по использованию в качестве армирующих материалов для оснований дорожных одежд различных геосинтетических материалов основаны, как правило, на частных эмпирических исследованиях. Следует признать, что в настоящее время в Российской Федерации нет единой научно обоснованной методологической базы для их использования. Для создания такой базы требуются глубокие

экспериментально-теоретические исследования, основанные на системном подходе» [12].

В настоящей работе исследуется основание дорожной одежды в виде двухслойной системы из щебня и песка, армированное плоской георешеткой со стальными волокнами.

## **МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ**

Экспериментальные исследования проводились в грунтовом канале Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета (СибАДИ). Канал имеет размеры в плане 6×3,15 м и глубину 1,2 м. В качестве исследуемого параметра рассматривался максимальный упругий прогиб поверхности двухслойной конструкции при ее нагружении круглым штампом.

Верхний слой толщиной 0,2 м состоит из щебня фракции 40 – 70 мм. «Нижний подстилающий слой толщиной 0,9 м – из мелкого песка плотностью частиц грунта 2,65 т/м<sup>3</sup>. Армирование устраивалось на границе раздела слоев. В качестве армирующего материала была использована плоская георешетка типа РД» [12], выпускаемая по СТО [13] и представленная на рис. 1.

«Георешетка образована из плоских металлопластиковых полос, соединенных между собой под углом 90° и наложенных друг на друга по высоте поочередно. Металлопластиковые полосы состоят из несущей части и покрытия. Несущая часть полос – стальные волокна из пружинной проволоки диаметром 0,6 мм, расположенные на определенном расстоянии друг от друга без переплетения. Покрытие полос – полиэтилен низкого давления. Соединение металлопластиковых полос между собой осуществляется методами термической сварки» [12].

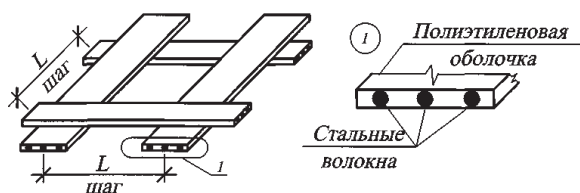


Рисунок 1 – Схема георешетки  
Illustration 1 – Geograting scheme

«В зависимости от прочности число проволок в полосе может составлять от 3 до 9 штук. Шаг ячейки может быть произвольным. Для наиболее полного исследования были рассмотрены георешетки марок РД – 30, РД – 60 и РД – 90, армирование которых составляет 3, 6 и 9 проволок соответственно. Такой выбор армирующего материала соответствует всему диапазону прочностей. Всего в испытании применялось девять типоразмеров армирующего материала: по размеру ячейки – 50×50, 75×75, 100×100 мм, по прочности – РД – 30, РД-60, РД – 90 [1], что соответствует прочности 30, 60 и 90 кН/м соответственно» [12].

Щебень фракции 40 – 70 мм отсыпался послойно с уплотнением на заранее уплотненный слой песка. «Коэффициент уплотнения щебня не контролировался, однако все испытания проводились в условиях, одинаковых для армированных и неармированной конструкций. Общая толщина щебня в уплотненном состоянии составила 200 мм. Нагружение осуществлялось через круглый штамп диаметром 33 см, который имитирует отпечаток колеса расчетного автомобиля. Нагрузка прикладывалась через гидравлический домкрат ступенями по 10 кН и достигала 50 кН» [12]. Схема испытания приведена на рис. 2, а.

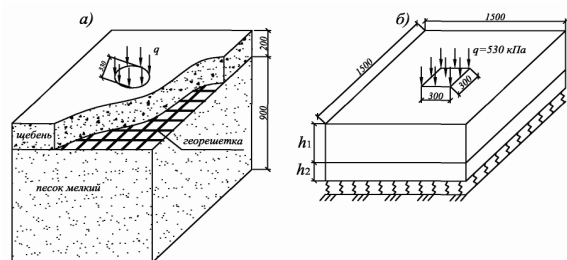


Рисунок 2 – Испытание конструкции:  
а) схема испытания; б) расчетная схема  
Illustration 2 – Constructions' test:  
test scheme; b) calculation scheme

Основным исследуемым параметром является прогиб на поверхности, который определялся с помощью индикаторов часового типа, установленных на верхней поверхности штам-

па. «Измерения проводились как при нагружении, так и при разгрузке конструкции для выделения упругой составляющей прогиба, который используется для вычисления модуля упругости. В качестве контрольной величины определялась величина прогиба неармированной конструкции» [12].

По полученным значениям упругих прогибов определялись модули упругости [14]

$$E_0 = \frac{Kd(1-\nu^2)\Delta q}{\Delta s}, \quad (1)$$

где  $K$  – коэффициент, принимаемый для жесткого штампа 0,79;  $d$  – диаметр штампа, м;  $\nu = 0,27$  – коэффициент Пуассона грунта;  $\Delta s$  – разность давлений под штампом, кПа;  $\Delta s$  – разность осадок штампа, м.

«Эффект армирования предлагается оценивать с помощью коэффициента  $C_w$ , который показывает в процентном отношении изменение максимального прогиба армированной конструкции по сравнению с неармированной» [12]

$$C_w = \left(1 - \frac{w_2}{w_1}\right) \cdot 100\%, \quad (2)$$

где  $w_1$  и  $w_2$  – максимальный прогиб неармированной и армированной системы соответственно [12].

Для теоретических расчетов исследуемая конструкция представляет собой зернистую среду [15], состоящую из двух слоев. «Рассмотрим отдельно оба слоя. Примем гипотезу, что слой щебня, который фактически представляет собой дискретную среду, будет вести себя как сплошная связная среда при условии, что в основании слоя размещена армирующая георешетка, воспринимающая растягивающие напряжения и тем самым обеспечивающее работу слоя как плиты на упругом основании. В таком случае для расчета армированного слоя щебеночного основания может быть использована техническая теория изгиба плит» [12, 16, 17].

Будем считать, что слой щебня представляет собой сплошную плиту при наличии армирующей прослойки. «Геометрические размеры такого слоя позволяют отнести его к жестким пластинам [18]. При малых деформациях основные усилия в таких пластинах возникают от изгиба. При этом появляются как растягивающие, так и сжимающие напряжения в слое. Щебень как дискретный материал не способен

воспринимать растягивающие напряжения. При введении армирующего слоя щебенки заанкериваются в нем и растягивающие напряжения воспринимает арматура. Песчаный слой при этом выполняет роль упругого основания» [12].

Из этих соображений армированный слой щебня можно рассматривать как многослойную плиту на упругом основании, состоящую из произвольного количества жестко сцепленных между собой слоев (рис. 2, б) [12, 20, 21]. «Физико-механические характеристики нижнего армирующего слоя будут существенно отличаться от характеристик вышележащих слоев, которые можно принять одинаковыми. В качестве примера примем толщину всей плиты 0,2 м с модулем упругости щебня 300 МПа и георешеткой РД-90 с шагом сетки 50х50 мм в качестве арматуры, что приводит к максимальному коэффициенту армирования. Модуль упругости армированного слоя, вычисленный методом осреднения по Фойгту (правило смесей), составит 509 МПа при представлении сплошной плиты в виде 4 слоев, 562 МПа – 5 слоев, 823 МПа – 10 слоев» [12].

С определенной долей идеализации данная модель может быть применена и для случая отсутствия армирующей прослойки. «При этом из расчетной схемы многослойной армированной плиты исключается нижний армирующий слой, а также слои, расположенные в растянутой зоне. Общая толщина плиты за счет этого уменьшится, а физико-механические характеристики слоев могут приниматься различными по толщине плиты с целью приближения расчетной модели к реальной конструкции. В частности, модули упругости слоев могут изменяться по убывающей» [12].

Примем, «что при изгибе многослойной плиты для всего пакета составляющих ее слоев справедливы гипотезы Кирхгофа-Лява. В этом случае дифференциальное уравнение изгиба плиты имеет вид» [12]:

$$D_{11} \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 3D_{13} \frac{\partial^4 w}{\partial x^3 \partial y} + 2(D_{12} + D_{33}) \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + 2D_{23} \frac{\partial^4 w}{\partial x \partial y^3} + D_{22} \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} + C_z w + q = 0, \quad (3)$$

где  $C_z$  – коэффициент постели;  $q=q(x,y)$  – интенсивность нагрузки на поверхности плиты;

$w=w(x,y)$  – функция прогибов;  $D_{11} \dots D_{33}$  – постоянные, характеризующие упругие свойства плиты.

Для двухслойной плиты постоянные  $D_{11} \dots D_{33}$  определяются из следующих выражений:

$$\begin{aligned} D_{11} &= d_{11} + c_{11} \cdot c_{11}^*; \\ D_{12} &= A_{12}^{(1)} g_1 + A_{12}^{(2)} g_2; \\ D_{22} &= A_{22}^{(1)} g_1 + A_{22}^{(2)} g_2; \\ D_{33} &= A_{33}^{(1)} g_1 + A_{33}^{(2)} g_2. \end{aligned} \quad (4)$$

Входящие в первое выражение (4) постоянные  $d_{11}$ ,  $c_{11}$ ,  $c_{11}^*$  вычисляются по формулам

$$d_{11} = A_{11}^{(1)} g_1 + A_{11}^{(2)} g_2; \quad (5)$$

$$c_{11}^* = \frac{(c_{21} b_{12} - c_{11} b_{22})}{(b_{11} b_{22} - b_{12} b_{21})}; \quad (6)$$

$$c_{11} = A_{11}^{(1)} p_1 + A_{11}^{(2)} p_2; \quad (7)$$

$$c_{21} = A_{21}^{(1)} p_1 + A_{21}^{(2)} p_2, \quad (8)$$

где  $A_{kj}$  – коэффициенты пропорциональности между напряжениями и деформациями, принимаемые равными для первого (неармированного) слоя [12]

$$A_{11}^{(1)} = A_{22}^{(1)} = \frac{E}{1-\nu^2};$$

$$A_{33}^{(1)} = \frac{E}{2(1+\nu)};$$

$$A_{12}^{(1)} = A_{21}^{(1)} = \frac{\nu E}{1-\nu^2}, \quad (9)$$

здесь  $E$  – модуль упругости щебеночного слоя;  $\nu$  – коэффициент Пуассона.

Входящие в выражения (4)-(8) постоянные определяют из выражений [12]

$$g_1 = \frac{h_1^3}{3}; \quad g_2 = \frac{1}{3}(3h_1^2 + 3h_1 h_2 + h_2^2)h_2, \quad (10)$$

$$p_1 = \frac{h_1^2}{2}; \quad p_2 = \frac{1}{2}(2h_1 + h_2)h_2, \quad (11)$$

здесь  $h_1$ ,  $h_2$  – толщины 1-го и 2-го слоев соответственно;

$$b_{11} = A_{11}^{(1)} h_1 + A_{11}^{(2)} h_2;$$

$$b_{22} = A_{22}^{(1)} h_1 + A_{22}^{(2)} h_2; \quad (12)$$

$$b_{12} = A_{12}^{(1)} h_1 + A_{12}^{(2)} h_2.$$

Для армированного слоя используем понятие конструктивной ортотропии [21].

Армирующая прослойка представляет собой плоскую георешетку регулярной структуры с ячейками прямоугольной формы. Суммарная площадь поперечных сечений армирующих волокон, ориентированных вдоль оси  $x$ , приходящаяся на ширину  $b$  поперечного сечения армирующей прослойки, нормального к оси  $x$ , равна

$$A_{ax} = n_x A_g, \quad (13)$$

где  $A_g$  – площадь поперечного сечения одного волокна;  $n_x$  – количество армирующих волокон, параллельных оси  $x$ , приходящихся на ширину  $b$  поперечного сечения.

Соответственно суммарная площадь поперечных сечений армирующих волокон, ориентированных вдоль оси  $y$ , приходящаяся на ширину  $a$  поперечного сечения армирующей прослойки, нормального к оси  $y$ , равна

$$A_{ay} = n_y A_g, \quad (14)$$

где  $n_y$  – количество армирующих волокон, параллельных оси  $y$ , приходящихся на ширину  $a$  поперечного сечения.

Заменим отдельно расположенные армирующие волокна (рис. 4, б) сплошным упругим композитным слоем толщиной  $h_2$  (рис. 4, в) с площадями поперечных сечений, нормальных к осям  $x$  и  $y$  соответственно

$$A_{2x} = b h_2; \quad A_{2y} = a h_2 \quad (15)$$

и коэффициентами армирования

$$\omega_x = \frac{A_{ax}}{A_{2x}}; \quad \omega_y = \frac{A_{ay}}{A_{2y}}. \quad (16)$$

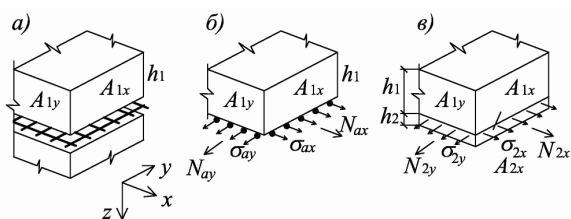


Рис. 4. Армированная плита:

- а) конструктивная схема плиты;
  - б) схема работы плиты с армирующими волокнами;
  - в) схема работы плиты с композитным слоем
- Illustration 4 – Reinforcing plate:  
a) constructive plate's scheme;  
b) working scheme of the reinforcing plate;  
c) working scheme of the plate with the composite layer

Такая замена позволяет упростить и унифицировать расчетную модель армированного слоя, представив ее в виде двухслойной системы с различными упругими характеристиками, постоянными в пределах каждого слоя.

Полагаем, что нормальные напряжения  $\sigma_{2x}$  и  $\sigma_{2y}$  в поперечных сечениях композитного слоя двухслойной плиты, совпадающих с гранями ячейки армирующей решетки, распределены равномерно по площадям  $A_{2x}$  и  $A_{2y}$  соответственно (рис. 4, в), а их равнодействующие  $N_{2x}$  и  $N_{2y}$  определяются из равенств

$$N_{2x} = \sigma_{2x} A_{2x}, \quad N_{2y} = \sigma_{2y} A_{2y}. \quad (17)$$

Усилия в армирующих волокнах  $N_{ax}$  и  $N_{ay}$  представим выражениями

$$N_{ax} = \sigma_a A_{ax}, \quad N_{ay} = \sigma_a A_{ay} \quad (18)$$

где  $\sigma_a$  – нормальные напряжения в армирующих волокнах.

Учитывая равенства (16) – (18), из условий

$$N_{ax} = N_{2x}, \quad N_{ay} = N_{2y} \quad (19)$$

Получим

$$\sigma_{2x} = \omega_x \sigma_a, \quad \sigma_{2y} = \omega_y \sigma_a. \quad (20)$$

Предположим, что для плиты, состоящей из двух упругих слоев, жестко соединенных между собой, справедлива гипотеза прямых нормалей Кирхгофа-Лява.

Для расчета на изгиб многослойной плиты на упругом основании используем метод Бубнова-Галеркина [19, 22]. Функцию прогибов зададим в виде двойного тригонометрического ряда [12]

$$w(x, y) = \sum_m \sum_n w_{mn} \cdot \sin \frac{m\pi x}{a} \cdot \sin \frac{n\pi y}{b}, \quad (21)$$

где  $m$  и  $n$  – целые числа в диапазоне  $1 \dots m$  и  $1 \dots n$ ;

$a$  и  $b$  – размеры плиты, м,

$w_{mn}$  – коэффициент ряда, вычисленный по формуле,

$$w_{mn} = \frac{q_{mn}}{(D_0 + C_z)}, \quad (22)$$

здесь  $D_0$  – общая цилиндрическая жесткость плиты [12]

$$D_0 = \left[ D_{11} \left( \frac{m\pi}{a} \right)^4 + 2(D_{12} + D_{33}) \left( \frac{m\pi}{a} \right)^2 \left( \frac{n\pi}{b} \right)^2 + D_{22} \left( \frac{n\pi}{b} \right)^4 \right]; \quad (23)$$

$q_{mn}$  – коэффициент ряда по нагрузке [18]:

$$q_{mn} = \frac{16q}{\pi^2 mn} \sin \frac{m\pi}{2} \sin \frac{m\pi \Delta x}{2a} \sin \frac{n\pi}{2} \sin \frac{n\pi \Delta y}{2a}, \quad (24)$$

где  $\Delta x$  и  $\Delta y$  – размеры грузовой площадки.

### РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты экспериментальных измерений упругих прогибов приведены в табл. 1, диаграммы изменения коэффициентов  $C_w$  приведены на рис. 3.

Для сравнения результатов экспериментальных измерений с теоретическими исследованиями был выполнен расчет двухслойной конструкции из щебня и песка: слой щебня толщиной  $h = 0.2$  м с модулем упругости  $E = 68,8$  МПа и коэффициентом Пуассона  $\nu = 0,3$ . Размеры плиты в плане  $1,5 \times 1,5$  м. Слой песка выполняет роль упругого ос-

нования с коэффициентом постели  $C_z = 116\ 308$  кН/м<sup>3</sup>. Грузовая площадка в виде квадрата со стороной  $0,30$  м, равновеликой отпечатку колеса диаметром  $0,33$  м. Интенсивность равномерно распределенной нагрузки  $q = 530$  кПа.

При вычислении максимального прогиба по формуле (21) было удержано три члена ряда ( $m = 1, 3, 5$ ), что обеспечило достаточную для практических целей точность. Результаты расчетов и сопоставление с экспериментальными данными приведены в таблице 2.

### ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ полученных экспериментальных данных показывает, что армирование стальной георешеткой позволяет снизить упругий прогиб системы «щебень-песок» до  $41,1$  %. Для разных размеров ячейки были получены результаты одного порядка, что лишь частично соответствует рекомендациям, изложенным в п.п. 5.1 ОДМ 218.5.002-2008, касающимся соотношений между размерами фракции щебня и ячейки георешетки. При этом прогиб, полученный в конструкции с размерами ячейки  $100 \times 100$ , оказался наименьшим, что вступает в противоречие с рекомендациями упомянутого нормативного документа.

Из общего ряда данных выпадают значения, полученные для георешетки с ячейкой  $100 \times 100$  мм марки РД – 60. Для данной конструкции прогиб увеличился на  $9,2$  %, что объясняется недоуплотнением щебня в данной серии экспериментов.

При расчете исследуемой конструкции без армирования значение прогиба составило

Таблица 1  
РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА  
Table 1  
EXPERIMENT'S RESULTS

Размер ячейки, мм	Марка армирующего материала	Упругий прогиб, $w$ , мм	Модуль упругости на поверхности, $E$ , МПа
50x50	РД-30	0,947	135
	РД-60	1,212	106
	РД-90	0,925	138
75x75	РД-30	0,860	149
	РД-60	0,998	128
	РД-90	0,917	140
100x100	РД-30	0,862	149
	РД-60	1,595	80
	РД-90	0,995	129
---	Без армирования	1,460	88

Таблица 2  
РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ  
Table 2  
THEORETICAL CALCULATION'S RESULTS

Размер ячейки, мм	Марка армирующего материала	Упругий прогиб, $w$ , мм					Погрешность, %
		$m=1$	$m=3$	$m=5$	$\bar{a}$	Эксперимент	
50×50	РД-30	0,986 7	0,011 5	0,000 1	0,998	0,947	5,39
	РД-60	0,888 6	0,009 3	0,000 1	0,898	1,212	25,79
	РД-90	0,810 5	0,007 9	0,000 1	0,818	0,925	11,57
75×75	РД-30	1,025 5	0,012 5	0,000 2	1,038	0,860	17,15
	РД-60	0,9513	0,0106	0,0001	0,962	0,998	3,61
	РД-90	0,8886	0,0093	0,0001	0,898	0,917	2,07
100×100	РД-30	1,0970	0,0137	0,0006	1,111	0,862	22,41
	РД-60	0,9867	0,0115	0,0001	0,998	1,595	59,81
	РД-90	0,9347	0,0103	0,0001	0,945	0,995	5,30

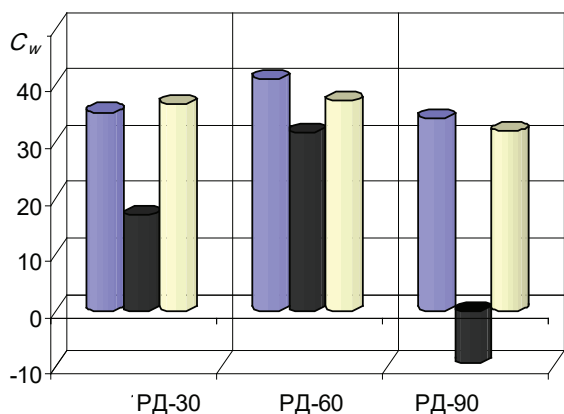


Рисунок 3 – Диаграммы изменения коэффициента  $C_w$  в зависимости от марки георешетки: 1) ячейка 50×50 мм; 2) ячейка 75×75 мм; 3) ячейка 100×100 мм  
Illustration 3 – Diagrams of the  $C_w$  coefficient changing according to the geograting: 50×50 mm size cell; 2) 75×75 mm size cell; 3) 100×100 mm size cell

1,29 мм при экспериментальном значении 1,46 мм (расхождение 11,6 %). Отличие расчетной модели конструкции без армирования заключается в следующем: при толщине зернистого слоя  $h$  в расчете участвует только сжатая зона поперечного сечения слоя, поэтому расчетная толщина плиты принимается равной  $h/2$ . Таким образом, можно говорить, что при введении в основание дорожной одежды из щебня и песка армирующей георешетки в расчете по упругому прогибу верхний слой данной конструкции можно рассматривать как многослойную плиту на упругом основании. При этом за общую толщину многослойной плиты можно принимать полную высоту щебеночного слоя. Для неармированного варианта общая толщина

многослойной плиты уменьшается до 50 % по сравнению с армированным вариантом в зависимости от фракции щебня и коэффициента постели упругого основания.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. При армировании плоской георешеткой со стальными волокнами системы «щебень-песок» упругий прогиб снижается до 41 %.

2. Слой щебня, армированный уложенной в его основание георешеткой, можно рассматривать как плиту на упругом основании за счет эффекта армирования. Эффект армирования возникает вследствие того, что слой щебня, который фактически является дискретной средой и не воспринимает растягивающих напряжений, за счет механического зацепления отдельных зерен с георешеткой включается в работу на всей толщине, а не только в сжатой зоне.

3. При отсутствии армирования модель многослойной плиты позволяет исключать из рассмотрения растянутую зону зернистого основания. При этом расчетная толщина плиты уменьшается, но сохраняется универсальность расчетной модели, которая может быть успешно применена для расчета как армированного, так и неармированного основания.

4. Предложенная методика расчета армированного зернистого слоя как многослойной плиты на упругом основании с использованием технической теории изгиба методом Бубнова-Галеркина приводит к быстро сходящемуся ряду с числом членов, не превышающим трех.

5. Сопоставление теоретических и экспериментальных результатов исследования показывает хорошую их сходимость, что является подтверждением адекватности предложенной расчетной модели.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Correia, N. S. Mechanical response of flexible pavements enhanced with geogrid-reinforced asphalt overlays/N. S. Correia, J. G. Zornberg // *Geosynthetics International*. – 2016.- 23(3).- pp. 183–193.
2. Scotland, I. Modelling deformation during the construction of wrapped geogrid-reinforced structures/I. Scotland, N. Dixon, M. Frost, G. Fowmes, G. Horgan // *Geosynthetics International*. – 2016.- 23(3).- pp. 219–232.
3. Liu, F.-Y. Cyclic and post-cyclic behaviour from sand-geogrid interface large-scale direct shear tests/F.-Y. Liu, P. Wang, X. Geng, J. Wang, X. Lin // *Geosynthetics International*. – 2016.- 23(2), pp. 129–139.
4. Gonzalez-Torre, I. Damage evaluation during installation of geosynthetics used in asphalt pavements /I. Gonzalez-Torre, M.A. Calzada-Perez, A. Vega-Zamanillo, D. Castro-Fresno// *Geosynthetics International*. – 2014.- 21(6).- pp. 377–386.
5. Edinçliler, A. Effects of EPS bead inclusions on stress-strain behaviour of sand /A. Edinçliler, and A.T. Ozer // *Geosynthetics International*. – 2014.- 21(2).- pp. 89–102.
6. Blanc, M. Geosynthetic reinforcement of a granular load transfer platform above rigid inclusions: comparison between centrifuge testing and analytical modelling /M. Blanc, L. Thorel, R. Girout, M. Almeida // *Geosynthetics International*. – 2014.- 21(1).- pp. 37–52.
7. Biswas, A. Influence of subgrade strength on the performance of geocell-reinforced foundation systems/A. Biswas, A. Murali Krishna, and S.K. Dash// *Geosynthetics International*. – 2013.- 20(6).- pp. 376–388.
8. Lin, Y.L. Experimental and DEM simulation of sandy soil reinforced with H–V inclusions in plane strain tests /Y.L. Lin, M.X. Zhang, A.A. Javadi, Y. Lu, and S.L. Zhang// *Geosynthetics International*. – 2013.- 20(3).- pp. 162–173.
9. Tanyu, B.F. Laboratory evaluation of geocell-reinforced gravel subbase over poor subgrades /B.F. Tanyu, A.H. Aydılek, A.W. Lau, T.B. Edil, C.H. Benson// *Geosynthetics International*. – 2013.- 20(2). - pp. 47–61.
10. Lim, S.Y. Evaluation of effect of backfill particle size on installation damage reduction factors for geogrids /S.Y.

- Lim, J.S. McCartney // *Geosynthetics International*. – 2013.- 20(2).- pp. 62–72.
11. Ferrellec, J.-F. Modelling of ballast-geogrid interaction using the discrete-element method /J.-F. Ferrellec, G.R. McDowell // *Geosynthetics International*. – 2012.- 19(6).- pp. 470–479
12. Матвеев С.А. Экспериментально-теоретические исследования армированного основания дорожной одежды / С.А. Матвеев, Е.А. Мартынов, Н.Н. Литвинов // *Вестник СиБАДИ*. – 2015. - № 4 (44). - С. 80-86.
13. СТО 30478650-001-2012. Георешетка дорожная армированная РД. — Красноярск: ООО «Техполимер», 2012. – 24 с.
14. ГОСТ 20276-2012. Грунты. Методы полевого определения характеристик прочности и деформируемости. Введ. 2013-07-01. М. : Стандартинформ, 2013. 34 с.
15. Клейн Г.К. Строительная механика сыпучих тел. М. : Стройиздат, 1977. 256 с.
16. Коренев Б.Г., Черниговская Е.И. Расчет плит на упругом основании. М. : Госстройиздат, 1962. 356 с.
17. Киселев В.А. Расчет пластин. М. : Стройиздат, 1973. 151 с.
18. Александров А.В., Потапов В.Д. Основы теории упругости и пластичности. М. : Высш. шк., 1990. 400 с.
19. Матвеев С.А., Немировский Ю.В. Армированные дорожные конструкции: моделирование и расчет. Новосибирск : Наука, 2006. 348 с.
20. Матвеев С.А. Моделирование и расчет многослойной армированной плиты на упругом основании // *Строительная механика и расчет сооружений*. 2012. № 3. С. 29 – 34.
21. Амбарцумян С.А. Теория анизотропных пластин. М. : Наука, 1987. 360 с.
22. Самуль В.И. Основы теории упругости и пластичности. М. : Высш. шк., 1982. 264 с.
23. ОДМ 218.5.002-2008 «Методические рекомендации по применению полимерных геосеток (георешеток) для усиления слоев дорожной одежды из зернистых материалов», Федеральное дорожное агентство (Росавтодор), Москва, 2008.

**THE INFLUENCE OF THE REINFORCING PROCESS ON THE DISCRETE BASIS OF PAVEMENT DEFLECTION**

*S.A. Matveev, E.A. Martynov, N.N. Litvinov*

**ANNOTATION**

*The active introduction of geosynthetic materials into road construction as the reinforcing structural elements of pavements, restrains by the absence of the evidently-based and experimentally confirmed theory of calculation of pavements with reinforcing layers. The results of the two-layered base made of crushed stone and sand, which are reinforced by geogrid with steel fibers in a polyethylene sheath are presented in the article. The deformation of the reinforced structure regularities are revealed and the deformation characteristics are obtained. The calculations model of reinforced layer made of the crushed stone is considered as the multilayered plate on the elastic basis, which consists of any layers number, which are rigidly linked among themselves. The lower layer with reinforcement has the physicommechanical characteristics which are determined by Foygt's averaging method and which is significantly different from characteristics of overlying layers. The sand layer performs the role of the elastic basis. This calculations model may be used for the «without reinforcement construction». Thus the lower reinforcing layer and the layers, which are located in tensile zone are excluded from the calculation scheme. The Bubnov-Galerkina's method is used for the calculation of the multilayered plate on the elastic basis. The proved coincidence of theoretical and experimental results is received. The reinforcing effect on deflections is established in the research.*

**KEYWORDS:** *discrete pavement basis, reinforcement, geogrid, reinforcing effect, elastic basis plate, deflection.*



**REFERENCES**

1. Correia N.S., Zornberg J.G. Mechanical response of flexible pavements enhanced with geogrid-reinforced asphalt overlays. *Geosynthetics International*, 2016, vol. 23(3), pp. 183–193.

2. Scotland I., Dixon N., Frost M., Fowmes G., Horgan G. Modelling deformation during the construction of wrapped geogrid-reinforced structures. *Geosynthetics International*, 2016, vol. 23(3), pp. 219–232.

3. Liu F.-Y., Wang P., Geng X., Wang J., Lin X. Cyclic and post-cyclic behaviour from sand–geogrid interface large-scale direct shear tests. *Geosynthetics International*, 2016, vol. 23(2), pp. 129–139.

4. Gonzalez-Torre I., Calzada-Perez M.A., Vega-Zamanillo A., Castro-Fresno D. Damage evaluation during installation of geosynthetics used in asphalt pavements. *Geosynthetics International*, 2014, vol. 21(6), pp. 377–386.

5. Edinçiler A., Özer A.T. Effects of EPS bead inclusions on stress–strain behaviour of sand. *Geosynthetics International*, 2014, vol. 21(2), pp. 89–102.

6. Blanc M., Thorel L., Girout R., Almeida M. Geosynthetic reinforcement of a granular load transfer platform above rigid inclusions: comparison between centrifuge testing and analytical modelling. *Geosynthetics International*, 2014, vol. 21(1), pp. 37–52.

7. Biswas A., Murali Krishna A., Dash S.K. Influence of subgrade strength on the performance of geocell-reinforced foundation systems. *Geosynthetics International*, 2013, vol. 20(6) pp. 376–388.

8. Lin Y.L., Zhang M.X., Javadi A.A., Lu Y., Zhang S.L. Experimental and DEM simulation of sandy soil reinforced with H–V inclusions in plane strain tests. *Geosynthetics International*, 2013, vol. 20(3), pp. 162–173.

9. Tanyu B.F., Aydilek A.H., Lau A.W., Edil T.B., Benson C.H. Laboratory evaluation of geocell-reinforced gravel subbase over poor subgrades. *Geosynthetics International*, 2013, vol. 20(2), pp. 47–61.

10. Lim S.Y., McCartney J.S. Evaluation of effect of backfill particle size on installation damage reduction factors for geogrids. *Geosynthetics International*, 2013, vol. 20(2), pp. 62–72.

11. Ferrellec J.-F., McDowell G.R. Modelling of ballast–geogrid interaction using the discrete-element method. *Geosynthetics International*, 2012, vol. 19(6), pp. 470–479.

12. Matveev S.A., Martynov E.A., Litvinov N.N. *Eksperimentalno-teoreticheskie issledovaniya armirovannogo osnovaniya dorozhnoy odezhdi* [Experimental-theoretical studies of the reinforced pavement foundation]. *Vestnik SibADI*, 2015, no 4(44), pp. 80 – 86.

13. STO 30478650-001-2012. Georeshetka dorozhnaya armirovannaya RD [Geogrids road reinforced RD]. Krasnoyarsk, Tehpolimer, 2012. 24 p.

14. GOST 20276-2012. Soils. Field methods for determining the strength and strain characteristics. Moscow, Standartinform, 2013. 34 p.

15. Kleyn G.K. *Stroitel'naya mekhanika sipuchih tel*

[Building mechanics of loose bodies]. Moscow, Stroyizdat, 1977. 256 p.

16. Korenev B.G., Chernigovskaya E.I. *Raschet plit na uprugom osnovanii* [Calculation of plates on an elastic base]. Moscow, Gosstoyizdat, 1962. 356 p.

17. Kiselev V.A. *Raschet plastin* [Calculation of plates]. Moscow, Stroyizdat, 1973. 151 p.

18. Aleksandrov A.V., Potapov V.D. *Osnovi teorii uprugosti i plastichnosti* [Fundamentals of the theory of elasticity and plasticity]. Moscow, Vishshaya shkola, 1990. 400 p.

19. Matveev S.A., Nemirovskiy Y.V. *Armirovannye dorozhnie konstruktzii: modelirovaniye i raschet* [Reinforced road structures: modeling and calculation]. Novosibirsk, Nauka, 2006. 348 p.

20. Matveev S.A. *Modelirovaniye i raschet mnogosloynnoy armirovannoy pliti na uprugom osnovanii* [Modeling and calculation of a multilayer reinforced slab on an elastic base]. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy* [Structural Mechanics and Analysis of Constructions], 2012, vol. 3, pp. 29–34.

21. Ambartsumian S.A. *Teoria anizotropnih plastin* [The theory of anisotropic plates]. Moscow, Nauka, 1987. 360 p.

22. Samul V.I. *Osnovi teorii uprugosti i plastichnosti* [Fundamentals of the theory of elasticity and plasticity]. Moscow, Vishshaya shkola, 1982. 264 p.

23. ODM 218.5.002-2008 «Metodicheskie rekomendatsii po primeneniyu polimernykh geosetok (georeshetok) dlia usiliya sloev dorozhnoi odezhdy iz zernistykh materialov» [Methodical recommendations on the use of geogrids for the reinforcing of layers of granular pavement], Federalnoe dorozhnoe agentstvo (Rosavtodor), Moscow, 2008.

**ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ**

*Matveev Sergey Aleksandrovich (г. Омск, Россия) – доктор технических наук, профессор, кафедра «Мосты и тоннели», ФГБОУ ВО «СибАДИ» (644080, г. Омск, пр. Мира, д. 5, e-mail: dfsibadi@mail.ru).*

*Matveev S.A. – doctor of technical Sciences, Professor, Siberian state automobile-highway University (SibADI), Department «Bridges and Tunnels» (644080, Omsk, Mira Av., 5, e-mail: dfsibadi@mail.ru).*

*Мартынов Евгений Анатольевич (г. Омск, Россия) – кандидат технических наук, доцент, кафедра «Мосты и тоннели», ФГБОУ ВО «СибАДИ» (644080, г. Омск, пр. Мира, д. 5, e-mail: asp-evg@mail.ru).*

*Martynov E.A. – candidate of technical Sciences, associate Professor, Siberian state automobile-highway University (SibADI), Department «Bridges and Tunnels» (644080, Omsk, Mira Av., 5, e-mail: asp-evg@mail.ru).*

*Литвинов Николай Николаевич (г. Омск, Россия) – старший преподаватель, кафедра «Мосты и тоннели», ФГБОУ ВО «СибАДИ» (644080, г. Омск, пр. Мира, д. 5, e-mail: niklitvinov\_23@mail.ru).*

*Litvinov N.N., Senior Lecturer – Siberian state automobile-highway University (SibADI), Department «Bridges and Tunnels» (644080, Omsk, Mira Av., 5, e-mail: niklitvinov\_23@mail.ru).*