

DOI: 10.15593/24111678/2017.02.04

УДК 625.81

Д.Е. Ведерников, Д.А. Татьянников

Пермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь, Россия

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРЕХ ВАРИАНТОВ УСТРОЙСТВА ВРЕМЕННЫХ ДОРОГ НА СЛАБОМ ОСНОВАНИИ

Рассмотрены варианты устройства временных дорог на слабом основании, а именно: устройство временной дороги по уплотненной насыпи из щебня фракции 40–70 мм толщиной 400 мм, устройство временной дороги из дорожных плиты по выровненному уплотненному основанию из щебня фракции 40–70 мм толщиной 100 мм, конструктивное усиление грунта каркасной сеткой «Росомаха».

С помощью программного комплекса Plaxis 2D выполнены расчеты общих деформаций. При моделировании грунтов основания была использована упругопластическая модель Мора–Кулона, которая включает пять основных исходных параметров: модуль общих деформаций E , коэффициент Пуассона ν , угол внутреннего трения φ , сцепление c , угол дилатансии ψ (угол увеличения объема грунта при увлажнении). При создании двумерной геометрической модели грунтовой массив разбивался на квадратичные 15-узловые клиновидные конечные элементы.

Инженерно-геологические условия были взяты с опытной площадки, находящейся в Пермском крае. Приняты следующие слои грунтов основания: ИГЭ-1 – суглинок текучий, с примесью органических веществ, толщиной 1,2 м; ИГЭ-2 – суглинок текучепластичный, с примесью органических веществ, толщиной 4,1 м; ИГЭ-3 – супесь пластичная, с примесью органических веществ, толщиной 1,0 м; ИГЭ-4 – супесь гравелистая, пластичная, толщиной 0,7 и 1,0 м; ИГЭ-5 – суглинок полутвердый, толщиной 1,1 м; ИГЭ-6 – аргиллит очень низкой прочности, размягчаемый, толщиной 1,1 м; ИГЭ-7 – алевролит очень низкой прочности, размягчаемый.

Представлены результаты численного моделирования и технико-экономического сравнения. Выполнен анализ исследуемых вариантов устройства временных дорог. На основании проведенных исследований сформулированы выводы.

Ключевые слова: временные дороги, сетка «Росомаха», слабые грунты, численное моделирование, Plaxis, технико-экономическое сравнение, дороги на слабых грунтах, автомобильная дорога.

D.E. Vedernikov, D.A. Tat'iannikov

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

NUMERICAL MODELING OF THE THREE VARIANTS THE DEVICE TEMPORARY ROADS ON WEAK GROUND

In this article deals with variants of mounting temporary roads on weak grounds: temporary road installed on compacted soil of rubble with fraction 40–70 mm, layer thickness 400 mm; temporary road device from the road plate at the bottom of the aligned compacted gravel with fraction 40–70 mm, layer thickness 100 mm; temporary road equipped with wireframe mesh "Rosomakha". With the help of the software complex Plaxis 2D, the author calculated the general deformations. In the step of modeling of the foundation soils, the elastoplastic Mora–Coulomb model was used, which includes five basic parameters: Module of general deformations – E ; Poisson's ratio – ν ; Angle of internal friction – φ , Grip – c , dilatancy angle (angle of increase in soil volume during wetting) – ψ . On a stage of creating a two-

dimensional geometric model, the soil block was divided into quadratic 15-node wedge-shaped finite elements. Engineering geological conditions are taken from the experimental site located in the Perm region. There are following layers consist a ground base: EGE-1 loam flowable admixture with organic substances, thickness 1.2 m; EGE-2 is a fluid-melting loam with an admixture of organic substances, thickness 4.1 m; EGE-3 sandy loam plastic with an admixture of organic substances with a thickness of 1.0 m; EGE-4 sandpaper gravel plastic 0,7 and 1,0 m thick; EGE-5 semi-solid loam with a thickness of 1.1 m; EGE-6 very low strength argillite, softened by a thickness of 1.1 m; EGE-7 aleurolite of very low strength, softened. The article presents the results of numerical simulations and the authors performed technical and economic comparison, also made an analysis of investigated variants of the device of temporary roads and on the basis of the researches the conclusions are formulated.

Keywords: temporary road, "Rosomakha" mesh, weak soils, numerical simulation, Plaxis, technical and economic comparison, roads on weak soils, highway.

Численное моделирование проводилось для следующих нагрузок на временную дорогу и временный проезд [1]:

1) гусеничная нагрузка общей массой 60 тс (НГ-60);

2) автомобильная нагрузка:

– нагрузка на ось 11,5 тс (соответствует нагрузке от автомобиля типа КраЗ-65053);

– нагрузка на ось 10 тс (соответствует нагрузке от таких автомобилей, как КамАЗ-65117, МАЗ-6422, Татра 815);

– нагрузка на ось 6 тс (соответствует нагрузке от таких автомобилей, как ГАЗ-53, Урал-377 (375), КамАЗ-5320 (5311), ЗИЛ-131).

В качестве оснований временных дорог и проездов моделировались инженерно-геологические разрезы, достаточно типичные для условий Пермского края (табл. 1):

– ИГЭ-1 – суглинок текучий, с примесью органических веществ 7–8 % (aQ), толщиной 1,2 м;

– ИГЭ-2 – суглинок текучепластичный, с примесью органических веществ 5–9 % (aQ), толщиной 4,1 м;

– ИГЭ-3 – супесь пластичная, с примесью органических веществ 3–8 % (aQ), толщиной 1,0 м;

– ИГЭ-4 – супесь гравелистая, пластичная (aQ), толщиной 0,7 и 1,0 м;

– ИГЭ-5 – суглинок полутвердый (eQ), толщиной 1,1 м;

– ИГЭ-6 – аргиллит очень низкой прочности, размягчаемый ($P1$), толщиной 1,1 м.

– ИГЭ-7 – алевролит очень низкой прочности, размягчаемый ($P1$).

Ширина сетки в расчетах принималась равной 4,5 м. Укладка каркасной сетки моделировалась по поверхности основания дороги для всех колесных нагрузок.

Первый вариант устройства временной дороги на слабом основании – по уплотненной насыпи из щебня фракции 40–70 мм толщиной 400 мм (рис. 1).

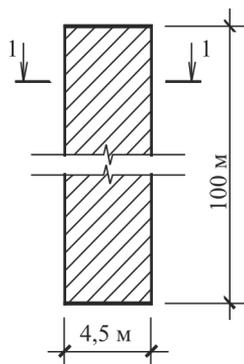
Таблица 1

Характеристики грунтов основания и насыпных материалов

Характеристики	ИГЭ-1	ИГЭ-2	ИГЭ-3	ИГЭ-4	ИГЭ-5	ИГЭ-6	ИГЭ-7	Щебень*
Удельный вес грунта, кН/м ³	18,70	19,10	20,40	20,90	20,00	20,50	20,50	17,00
Удельный вес насыщенного грунта, кН/м ³	19,40	19,26	20,65	21,35	20,58	21,26	21,66	19,16
Коэффициент фильтрации, м/сут	0,0180	0,8110	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	–
Модуль общей деформаций, кН/м ²	4500	10 000	24 000	32 000	25 000	30 000	30 000	50 000
Коэффициент Пуассона	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,27
Сцепление, кН/м ²	6	11	16	21	57	51	52	2
Угол трения, град	20	7	27	30	33	11	12.70	43
Угол дилатансии, град	0	1	1	1	1	1	1	13

*Примечание. Характеристики щебня приняты в соответствии с табл. 10 Рекомендаций по проектированию дорожных покрытий лесовозных автомобильных дорог (М., 1962).

План временной дороги



Разрез 1-1

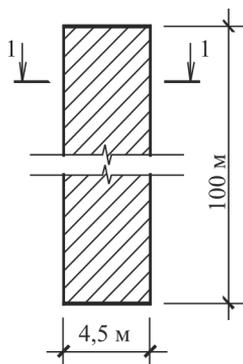


Рис. 1. Схема устройства временной дороги по 1-му варианту

Второй вариант – устройство временной дороги из дорожных плиты по выровненному уплотненному основанию из щебня фракции 40–70 мм толщиной 100 мм (рис. 2).

Третий вариант – конструктивное усиление грунта каркасной сеткой «Росомаха» (рис. 3).

План временной дороги



Разрез 1-1

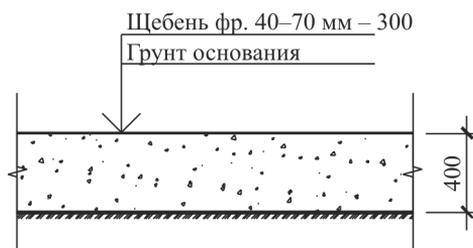
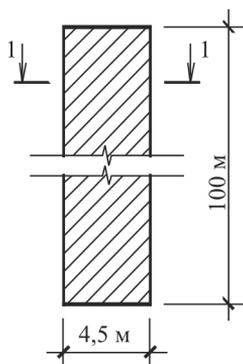


Рис. 2. Схема устройства временной дороги по 2-му варианту

План временной дороги



Разрез 1-1

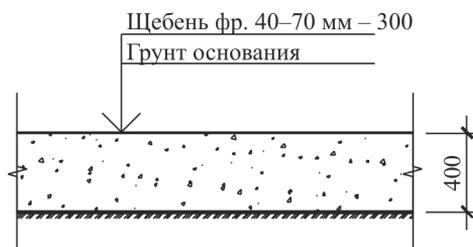


Рис. 3. Схема устройства временной дороги по 3-му варианту

«Росомаха» – это инновационная тканая каркасная сетка из полиэфирной мононити, собственная разработка Краснокамского завода металлических сеток (торговая марка ROSSET) [2].

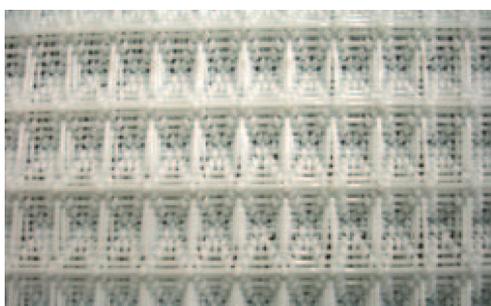


Рис. 4. Общий вид сетки КС 16/1006-1

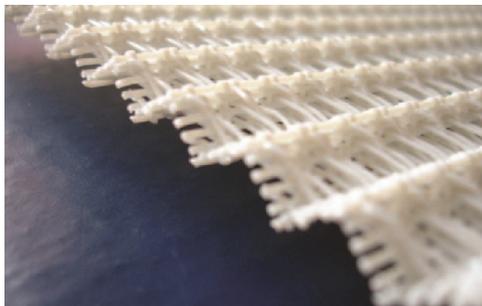


Рис. 5. Профиль сетки КС 16/1004

При расчетах использовались следующие характеристики кар-касной сетки (ТУ 3651-039-00279597–2014) (табл. 2):

- толщина – $12,0 \pm 0,5$ мм;
- поверхностная плотность – $1,6 \pm 0,1$ кг/м²;
- разрывная нагрузка – 60 кН/м;
- относительное удлинение при разрыве – 10 %.

Таблица 2

Технические характеристики сетки КС 16/1006-1

Количество нитей в см/шт.		Номинальный диаметр, мм (материал мононити)		Разрывная нагрузка, кгс, не менее		Относительное удлинение при разрыве, %, не менее		Толщина сетки, мм	Среднефактическая масса сетки, кг	Напряжение изгиба при нормативном прогибе, МПа (DIN ISO 178), среднефактическое значение
Вдоль	Поперек	Вдоль	Поперек	Вдоль	Поперек	Вдоль	Поперек			
$16,0 \pm 5$	$7,5 \pm 0,5$	0,65 (Пэ)	0,90 (Пэ)	60,0	60,0	10,0	10,0	$12,0 \pm \pm 0,5$	$1,6 \pm 0,1$	4,0

Более подробно методы устройства временных дорог описаны в работах [3, 4].

Для моделирования пятна контакта автомобильных шин и гусениц осевая нагрузка передавалась на грунт основания через плиту.

Согласно п. 3.1.2 ГОСТ Р 50597–93 «Автомобильные дороги и улицы. Требования к эксплуатационному состоянию, допустимому по условиям обеспечения безопасности дорожного движения» предельные размеры отдельных просадок, выбоин и т.п. не должны превышать по длине 15 см, по ширине 60 см и по глубине 5 см. В связи с тем что в данной статье рассматривается устройство временных дорог, прием максимально допустимые общие деформации не более 70 мм [5, 6].

Расчет велся с изменяемыми сеткой и давлением воды. Консолидация ограничивалась вертикально левой и правой границами [7, 8].

Результаты численного моделирования общих деформаций по 1-му варианту устройства временной дороги на слабом основании (насыпи из щебня фракции 40–70 мм толщиной 400 мм) представлены на рис. 6; по 2-му варианту – на рис. 7; по 3-му – на рис. 8. Результаты численного моделирования общих деформаций без усиления грунта (4-й вариант) показаны на рис. 9.

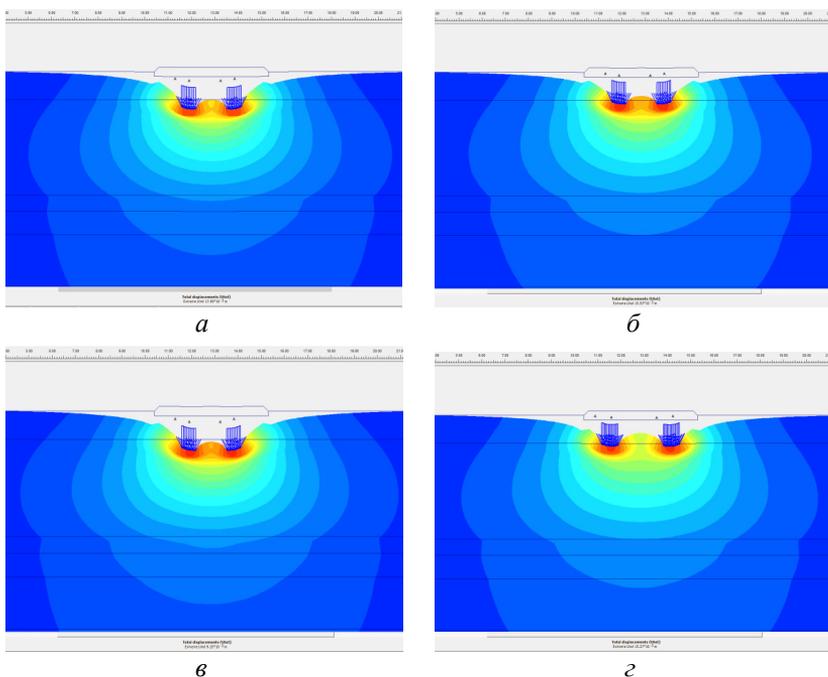


Рис. 6. Численное моделирование общих деформаций по 1-му варианту устройства временной дороги на слабом основании. Нагрузка: а – А11,5; б – А10; в – А6; г – НГ60. Масштаб 50:1

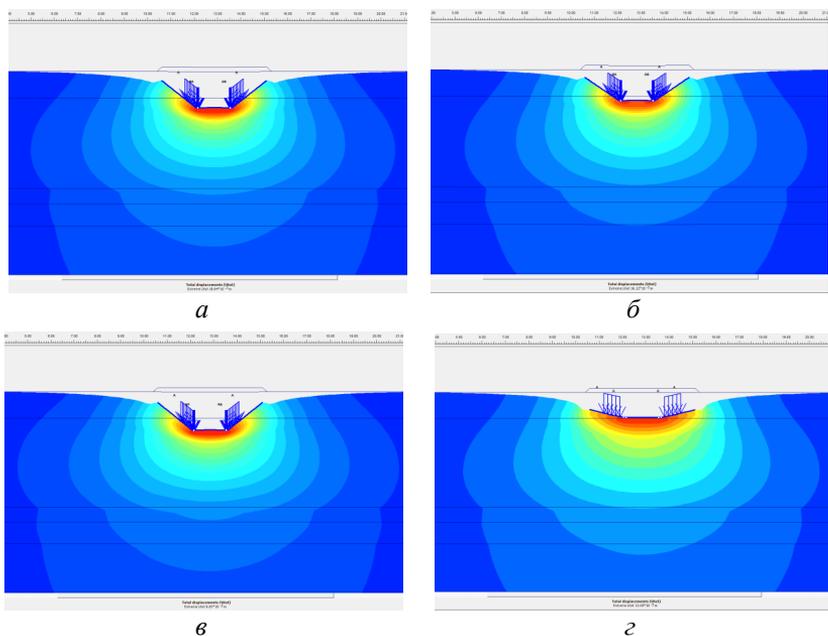


Рис. 7. Численное моделирование общих деформаций по 2-му варианту устройства временной дороги на слабом основании. Нагрузка: а – А11,5; б – А10; в – А6; г – НГ60. Масштаб 50:1

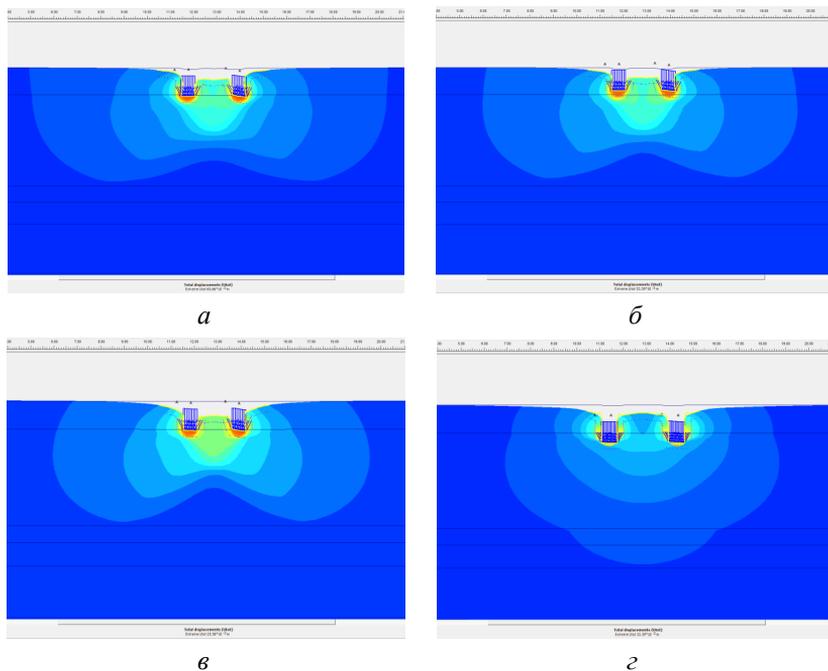


Рис. 8. Численное моделирование общих деформаций по 3-му варианту устройства временной дороги на слабом основании.
Нагрузка: а – А11,5; б – А10; в – А6; г – НГ60. Масштаб 50:1

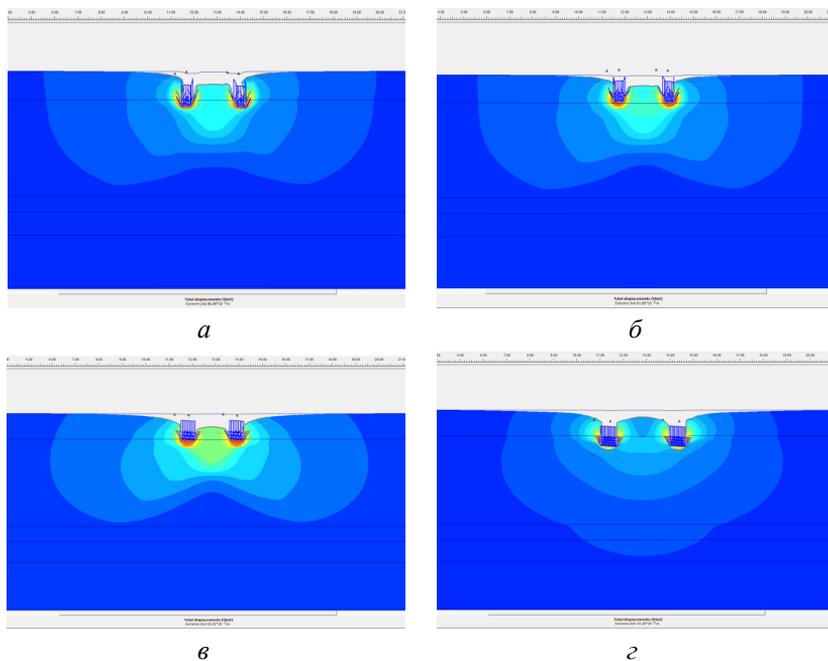


Рис. 9. Численное моделирование общих деформаций при устройстве временной дороги на слабом основании без усиления грунта.
Нагрузка: а – А11,5; б – А10; в – А6; г – НГ60. Масштаб 50:1

Результаты численного моделирования представлены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты численного моделирования

Номер варианта	Деформации грунтового основания при расчетных нагрузках, мм			
	A11,5	A10	A6	НГ60
1	17,19	15,53	9,25	15,27
2	18,64	16,12	9,87	13,68
3	65,66	53,39	25,56	32,39
4	80,89	61,85	25,52	34,39

На основании полученных данных был построен график общих деформаций [9] временных дорог (рис. 10).

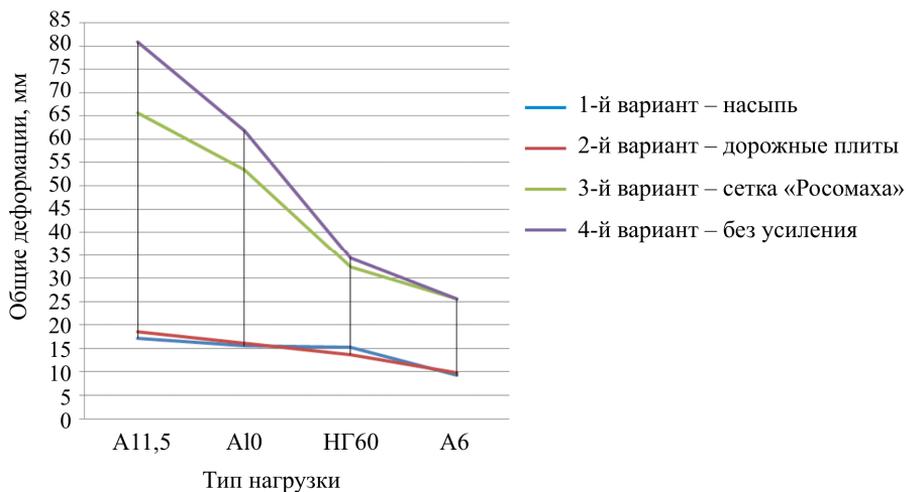


Рис. 10. График общих деформаций временных дорог

Результаты численного моделирования позволили нам прийти к следующим выводам:

1. Варианты 3 и 4 заметно уступают вариантам 1 и 2 относительно максимальных общих деформаций в 4,7–3,5 раза, но все же оказываются в пределах допустимого – 70 мм (кроме 4-го варианта при нагрузке A11,5). В связи с этим только три первых варианта возможны для применения.

2. По графикам вариантов 3 и 4 (см. рис. 10) видно, как с приращением нагрузки включается в работу сетка «Росомаха», уменьшая тем самым общие деформации.

3. Применение сетки «Росомаха» уменьшает деформации основания на 18–20 %. При нагрузке А11,5 деформации по 4-му варианту превышают предельные значения, а по 3-му варианту нет. Это говорит о том, что применение сетки позволит технике проезжать по данному типу грунта.

Поскольку численное моделирование не позволяет произвести более точное сравнение вариантов и выявить их плюсы и минусы, было проведено технико-экономическое сравнение [3, 8]. В связи с тем что 4-й вариант не всегда возможно применить, были рассмотрены только 1, 2, 3-й варианты. В расчетах принимались следующие допущения: дорожные плиты можно применить повторно 20 раз, сетку «Росомаха» – 5 раз [10]. Результаты технико-экономического сравнения представлены в табл. 4. На основании данной таблицы был построен график накопительных прямых затрат (рис. 11) [3].

Таблица 4

Технико-экономическое сравнение вариантов устройства временных дорог на слабом основании

Номер варианта	Прямые затраты в зависимости от количества временных дорог, руб.				
	1	5	10	15	20
1	364 881,20	1 824 406,00	3 648 812,00	5 473 218,00	7 297 624,00
2	1 130 313,20	1 976 766,00	3 034 832,00	4 092 898,00	5 150 964,00
3	451 200,00	456 000,00	912 000,00	1 368 000,00	1 824 000,00

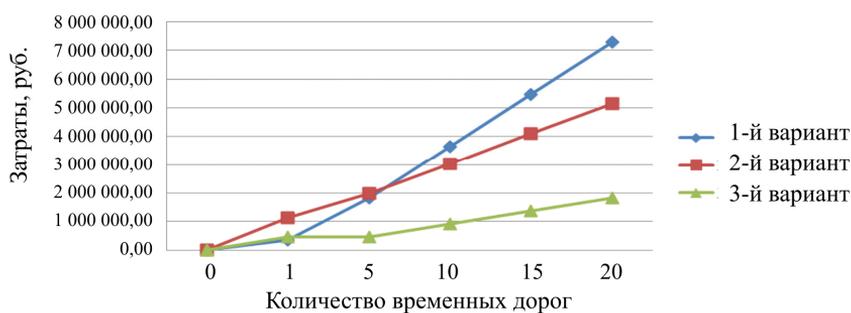


Рис. 11. Накопительные прямые затраты на устройствах временных дорог на слабом основании

В результате проведенных исследований были сформулированы следующие выводы:

1. При условии что в год выполняется одна временная дорога, применение 3-го (сетка «Росомаха») и 2-го вариантов (дорожные плиты)

ты) нерационально; наиболее оптимален 1-й вариант (насыпь из щебня), особенно если есть возможность совместить временные и постоянные дороги.

2. В случае когда в год выполняется пять временных дорог, применение 1 и 2-го вариантов одинаково по прямым затратам (порядка 2 млн руб.) и не является рациональным. Более оптимален в данном случае 3-й вариант (сетка «Росомаха»), поскольку его применение дешевле в 4,33 раза.

3. В случае когда в год выполняется более пяти временных дорог, все три графика выравниваются. Самым экономически выгодным является 3-й вариант: в 2,8 раза по сравнению со 2-м вариантом и в 4,0 раза по сравнению с 1-м вариантом.

4. При разработке проекта на устройство временных дорог необходимо учитывать не только разовые прямые затраты, но и проводить анализ возможности повторного использования материалов. Немаловажными также являются такие параметры, как скорость устройства, необходимые складские площадки, количество средств механизации и т.д. Известно, что самым эффективным способом является совмещение временных и постоянных дорог. В связи с этим 1-й вариант устройства временных дорог всегда нужно применять, когда есть возможность совместить временные и постоянные проезды и площадки, а в местах, где это сделать невозможно, самый рациональный вариант – устройство временной дороги с применением каркасной сетки «Росомаха».

5. Результаты численного моделирования и технико-экономического сравнения подтверждают экономическую эффективность применения сетки «Росомаха» при устройстве дорог на слабом основании.

Список литературы

1. Рубцова М.В., Клевко В.И. Применение геосинтетического материала для обеспечения устойчивости автодорожной насыпи на слабом основании и сокращение сроков строительства // Экология и научно-технический прогресс. Урбанистика. – 2015. – № 1. – С. 489–497.

2. Ведерников Д.Е., Татьяников Д.А. Техничко-экономическое сравнение устройства временных дорог на слабых грунтах // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. – 2017. – Т. 8, № 1. – С. 156–166. DOI: 10.15593/2224-9826/2017.1.14

3. Ведерников Д.Е., Татьянников Д.А. Обзор современных конструктивных методов улучшения основания // Новая наука: стратегии и векторы развития. – 2016. – № 5–2 (82). – С. 146–154.

4. Клевекко В.И. Применение геосинтетических материалов в дорожном строительстве в условиях Пермского края // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. – 2013. – № 1. – С. 114–123.

5. Раковская М.И. Численное моделирование контактного взаимодействия основания и плит покрытия временных автомобильных дорог: дис. ... канд. техн. наук. – Петрозаводск, 2004. – 148 с.

6. Машина для ремонта временных зимних дорог / Ш.М. Мерданов, Ю.Г. Сысоев, В.А. Костырченко, Т.М. Мадьяров // Инженерный вестник Дона. – 2014. – № 2 (29). – С. 101.

7. Татьянников Д.А., Пономарев А.Б. Численное моделирование работы конструкций армированных фундаментных подушек // Вестник Моск. гос. строит. ун-та. – 2016. – № 11. – С. 21–31. DOI: 10.22227/1997-0935.2016.11.21–31

8. Васильев А.С., Шегельман И.Р., Скрипник В.И. Технико-экономическая оценка эффективности модернизированного лесовозного автопоезда // Наука и бизнес: пути развития. – 2012. – Вып. 9 (15). – С. 71–73.

9. Глухов В.С., Галова Ю.С., Галов А.С. Мониторинг осадок зданий на комбинированном основании // Актуальные проблемы современного фундаментостроения с учетом энергосберегающих технологий: материалы V Всерос. науч.-практ. конф. – Пермь, 2014. – С. 20–22.

10. Пономарев А.Б., Клевекко В.И., Татьянников Д.А. Анализ изменения прочностных характеристик геосинтетических материалов в процессе эксплуатации // Научный вестник Воронеж. гос. арх.-строит. ун-та. Строительство и архитектура. – 2014. – № 3 (35). – С. 11–16.

References

1. Rubtsova M.V., Kleveko V.I. *Primenenie geosinteticheskogo materiala dlia obespecheniia ustoichivosti avtodorozhnoi nasypi na slabom osnovanii i sokrashchenie srokov stroitel'stv* [Application of geosynthetic material to ensure stability of road embankment in the weak base and reduce construction time]. *Ekologiya i nauchno-tekhnicheskii progress. Urbanistika*, 2015, no. 1, pp. 489-497.

2. Vedernikov D.E., Tat'iannikov D.A. Tekhniko-ekonomicheskoe sravnenie ustroystva vremennykh dorog na slabykh gruntakh [Technical and economic comparison of building of temporary roads on weak soilp]. *Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Construction and Architecture*, 2017, Vol. 8, no. 1, pp. 156-166, doi: 10.15593/2224-9826/2017.1.14.

3. Vedernikov D.E., Tat'iannikov D.A. Obzor sovremennykh konstruktivnykh metodov uluchsheniia osnovaniia [Review of modern constructive methods for improving the base]. *Novaia nauka: strategii i vektory razvitiia*, 2016, no. 5–2 (82), pp. 146-154.

4. Kleveko V.I. Primenenie geosinteticheskikh materialov v dorozhnom stroitel'stve v usloviakh Permskogo kraia [The use of geosynthetics in road construction in the conditions of the Perm Region]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura*, 2013, no. 1, pp. 114-123.

5. Rakovskaia M.I. Chislennoe modelirovanie kontaktnogo vzaimodeistviia osnovaniia i plit pokrytiia vremennykh, avtomobil'nykh dorog [Numerical modeling of the contact interaction of the base and slabs covering temporary, highways]. PhD Thesis. Petrozavodsk, 2004. 149 p.

6. Merdanov S.H. M., Sisoiev Y.G., Kostirchenko V.A., Madyarov T.M. Mashina dlia remonta vremennykh zimnikh dorog. [Machine Repair temporary winter roads]. *Inzhenernyi vestnik Dona*, 2014, no. 2 (29), pp. 101.

7. Tat'iannikov D.A., Ponomarev A.B. Chislennoe modelirovanie raboty konstruksii armirovannykh fundamentnykh podushek [Numerical modeling of structures reinforced foundation pads]. *Vestnik MGSU*, 2016, no. 11, pp. 21-31, doi: 10.22227/1997-0935.2016.11.21-31.

8. Vasil'ev A.S., Shegel'man I.R., Skrypnik V.I. Tekhniko-ekonomicheskai otsenka effektivnosti modernizirovannogo lesovoznogo avtopoezda [Technical and economic assessment of the efficiency of the modernized timber road truck]. *Nauka i biznes: puti razvitiia*, 2012, Iss. 9 (15), pp. 71-73

9. Glukhov V.S., Galova Yu.S. Galov A.S. Monitoring osadok zdaniia na kombinirovannom osnovanii [Monitoring settlement of buildings on the basis of combined]. Aktual'nye problemy sovremennogo fundamentostroeniia s uchetom energosberegaiushchikh tekhnologii: materialy V vserosiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii. Perm, 2014, pp. 20-22.

10. Ponomarev A.B., Kleveko V.I., Tat'iannikov D.A. Analiz izmeneniia prochnostnykh kharakteristik geosinteticheskikh materialov v protsesse ekspluatatsii [Analysis of changes in the strength characteristics of

geosynthetic materials during operation]. *Nauchnyi vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura*, 2014, no. 3 (35), pp. 11-16.

Получено 27.04.2017

Об авторах

Ведерников Дмитрий Евгеньевич (Пермь, Россия) – магистрант кафедры «Строительное производство и геотехника», Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: vedernikovde@mail.ru).

Татьянников Даниил Андреевич (Пермь, Россия) – аспирант, ассистент кафедры «Строительное производство и геотехника», Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: danco777@mail.ru).

About the authors

Dmitrii E. Vedernikov (Perm, Russian Federation) – Master Student, Department of Construction Technology and Geotechnics, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: vedernikovde@mail.ru).

Daniil A. Tat'iannikov (Perm, Russian Federation) – Postgraduate Student, Assistant, Department of Construction Technology and Geotechnics, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: danco777@mail.ru).