Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и тоннелей

УДК 624.6

DOI 10.23968/1999-5571-2018-16-3-152-160

© Н. И. Горшков, д-р техн. наук

© N. I. Gorshkov, Dr. Sci. Tech.

© М. А. Краснов, инженер

© M. A. Krasnov, engineer

© А. Д. Ловцов, д-р техн. наук

© A. D. Lovtsov, Dr. Sci. Tech.

© В. С. Фёдорова, старший преподаватель

© V. S. Fedorova, senior teacher

(Тихоокеанский государственный университет)

(Pacific National University)

E-mail: valery2087@mail.ru

E-mail: valery2087@mail.ru

АНАЛИЗ И ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СИСТЕМЫ «МЕТАЛЛИЧЕСКАЯ ГОФРИРОВАННАЯ ТРУБА (МГТ) – ОСНОВАНИЕ – НАСЫПЬ» НА ОСНОВЕ МКЭ

ANALYSIS AND EVALUATION OF THE STRESS-STRAIN STATE OF THE “STEEL CORRUGATED PIPE (SCP) – FOUNDATION – BACKFILL” SYSTEM BASED ON FEM

Цель работы — математическое моделирование взаимодействия элементов системы «металлическая гофрированная труба–основание–насыпь» в двух различных программных комплексах, анализ и оценка напряженно-деформированного состояния (НДС) этой системы на основе метода конечных элементов (МКЭ). Для моделирования двумерной модели были использованы ПК Лира и ПК GenIDE32. Особенности расчета — принимаемая модель грунта и учет последовательности возведения металлических гофрированных труб (МГТ) и грунтовой обоймы вокруг. Для сравнения расчеты выполнялись по трем схемам в каждом ПК: 1) упругая модель грунта без учета последовательности возведения; 2) упругопластический грунт без учета последовательности возведения; 3) упругопластический грунт с учетом последовательности возведения.

Ключевые слова: металлическая гофрированная труба (МГТ), метод конечных элементов (МКЭ), прочность, деформируемость, грунтозасыпной мост.

The aim of the work is the mathematical modeling of the interaction of the elements of the «steel corrugated pipe–base–backfill» system in two different software packages, analysis and evaluation of the stress-strain state of this system based on FEM. To simulate a two-dimensional model, the PC Lira and the PC GenIDE32 were used. The features of the calculation are the accepted soil model and the consideration of the sequence of construction of the steel corrugated pipe (SCP) and the soil backfill. For comparison, the calculations were carried out according to three schemes in each PC: 1) flexible model of soil without taking into account the sequence of construction, 2) elastic-plastic soil without taking into account the sequence of construction, 3) elastic-plastic soil taking into account the sequence of construction.

Keywords: steel corrugated pipe (SCP), finite element method (FEM), strength, deformability, soil-filling (buried) bridge.

Введение

В настоящее время металлические гофрированные трубы (МГТ) разного конструктивно-го исполнения нашли широкое применение в транспортном строительстве как у нас в стране,

так и за рубежом [1–3]. Их используют как для ремонта существующих труб, малых и средних мостов, так и для нового строительства. В 2017 году в СП 35.13330.2011 «СНиП 2.05.03–84 Мосты и трубы» было введено понятие «мосто-

вое сооружение из металлических гофрированных элементов: засыпной мост в виде арки...» и, следовательно, обозначена область применения данных конструкций и нормы проектирования для «мостовых сооружений». Единой методики расчета МГТ не существует.

В современной практике строительного проектирования сооружение и вмещающая его геотехногенная среда рассматриваются как единое целое, составные части которого взаимно влияют друг на друга.

Как правило, при проектировании таких сложных сооружений, как МГТ, кроме подходов, рекомендуемых национальными нормами¹, еще выполняются расчеты на не менее двух разных по происхождению программных комплексах, основанных на численных методах².

В связи с особенностями и возможностями программных средств практический интерес представляет сравнение результатов расчетов, выполненных для одного объекта разными ПК.

Для реального проекта были выполнены сравнительные расчеты на основе МКЭ при помощи ПК Лира [4] и GenIDE32³.

Объект исследования — металлическая гофрированная труба (МГТ), устраиваемая в целях пропуска поверхностных вод водотока, проходящего под высокой насыпью автомобильной дороги. В поперечном сечении тело трубы представляет собой двухрадиусную арку, выполненную из двойного металлического гофра (рис. 1): высота 10,152 м, пролет 13,622 м. Мощность грунта над трубой $h = 16,64$ м.

В верхней части трубы устанавливается металлическая затяжка из двух швеллеров № 24. В нижней части труба шарнирно опирается на железобетонный ростверк, который объединяет один ряд буронабивных свай. Сваи диаметром $d = 0,80$ м имеют длину 5,50 м, расстояние между

осями 3,0 м. Сваи проходят дисперсные грунты и заделываются в скальный грунт — гнейс средней прочности (табл. 1).

Значения деформационных и прочностных параметров (по первому предельному состоянию) природных грунтов, материалов элементов системы приняты по документам, представленным заказчиком. Отсутствующие в документах значения расчетных параметров материалов и грунтов приняты из других источников [5].

Для металла арки и распорок приняты следующие расчетные параметры: $\gamma_1 = 0,075$ МН/м³, $E = 206\,000$ МПа, $\nu = 0,20$, $R_c = 300$ МПа, $R_t = 295$ МПа. Для материала свай и ростверка (бетон В30) приняты следующие параметры: $\gamma_1 = 0,025$ МН/м³, $E = 32\,500$ МПа, $\nu = 0,20$, $R_c = 15,5$ МПа, $R_t = 1,1$ МПа.

Основные геометрические параметры поперечного сечения свай диаметром 0,80 м: площадь $A_0 = 0,5024$ м², момент инерции $I_0 = 0,020096$ м⁴. Длина ростверка при количестве свай ($n = 36$) равна $L = 105,80$ м.

Так как свая взаимодействует с грунтом как свая-стойка, то приведенная ширина ряда свай в рамках задачи плоской деформации определяется из условия равенства площадей поперечного сечения одного погонного метра и свай: $b \cdot 1,0 = A_0$, где $b = 0,5024$ м (ширина условного свайного фундамента). Приведенный модуль упругости условного фундамента определяется из условия равенства жесткостей условного фундамента и свайного из 36 свай: $E_b \cdot I_b = n \cdot E_0 \cdot I_0$ или $E_b \cdot (L \cdot b^3) / 12 = E_0 \cdot (n \cdot 0,0491 \cdot d)$, где $E_b = 21\,030$ МПа.

Методика исследования

В работах [6, 7] показано, что расчет объемной модели системы «МГТ–основание–насыпь» выявил незначительное влияние пространственного эффекта, не превышающего 1 % по перемещениям в сравнении с плоской моделью. В настоящей работе принята плоская модель. В [6] также указывается, что результаты расчетов, в которых выполняется моделирование постатийной засыпки, полностью соответствуют результатам натурных экспериментов при практически любой расчетной схеме системы. Во всех вышеупомянутых исследованиях расчетные значения перемещений и деформаций (усилий) в испытываемых конструкциях превышают фактические значения.

¹ ОДМ 218.2.001–2009. Рекомендации по проектированию и строительству водопропускных сооружений из металлических гофрированных структур на автомобильных дорогах общего пользования с учетом региональных условий (дорожно-климатических зон) (заменяет ВСН 176–78. Инструкция по проектированию и постройке металлических гофрированных водопропускных труб).

² Письмо Главгосэкспертизы России № 24-10-3/1281 от 28.06.04.

³ Программа GenIDE32 для решения прикладных задач геомеханики в строительстве / Горшков Н. И., Краснов М. А. СИСТЕМА СЕРТИФИКАЦИИ ГОСТ Р ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНСТВО ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ. СЕРТИФИКАТ СООТВЕТСТВИЯ № RA.RU.AB86.H01026, срок действия с 28.06.2017 по 27.06.2020.

Рис. 1. Расчетные схемы: а — ПК Лира; б — ПК GenIDE32; в — характеристики расчетного поперечного сечения

Для решения плоской задачи использовались три схемы расчета:

- упругое решение (мгновенное возведение системы);
- упругопластическое решение (мгновенное возведение);
- упругопластическое решение (последовательное моделирование устройства элементов конструкции системы с учетом начального НДС природного массива грунтов).

В расчетах по программе «Лира» для моделирования арки и свай использовался конечный элемент (КЭ) плоской рамы (тип 2); для моделирования затяжки — КЭ плоской фермы (тип 1); для моделирования грунта — физически нелинейный универсальный четырехугольный КЭ плоской задачи (грунт, тип 284).

В расчетах НДС по GenIDE32 использовались плоские и одномерные КЭ, а также нелинейная модель грунта на основе ассоциированного зако-

Таблица 1

Расчетные значения параметров материалов насыпи и грунтов основания

Номер ИГЭ и наименование грунта	γ_r , МН/м ³	E , МПа	ν	$\varphi_1 (R_c)$, град (МПа)	$c_1 (R_t)$, МПа (МПа)
№ 1 – щебенистый грунт (материал насыпи)	0,021	45,0	0,27	40	0,005
№ 2 – щебенистый грунт (материал обоймы)	0,018	45,0	0,27	40	0,00
№ 3 – галечниковый грунт, насыщенный водой (основание 1)	0,0105	41,0	0,27	40	0,00
№ 4 – суглинок легкий твердый (основание 2)	0,0213	27,0	0,20	24	0,058
№ 5 – щебенистый грунт с супесью пылеватой, твердой (основание 3)	0,0215	41,0	0,27	39	0,00
№ 6 – гнейс средней прочности, слабовыветрелый, размягчаемый (основание 4)	0,026	580	0,20	(32,25)	(3,22)
№ 7 – гнейс прочный, слабовыветрелый, размягчаемый (основание 5)	0,0265	650	0,20	(88,88)	(8,89)

на пластического течения с условием текучести по Кулон–Мору, как для дисперсных, так и для скальных (сплошных) грунтов (материалов).

Все расчеты для материалов обсыпок и насыпи выполнялись с коэффициентом надежности по нагрузке $\gamma_{fc} = 1,10$. Расчетные схемы системы (учет симметрии) представлены на рис. 1. Размеры по горизонтали равны $5b$, где b — пролет арки.

В ПК Лира последовательность возведения учитывалась путем указания элементов конструкции каждой стадии в соответствии с технологией строительства. В результате моделирования получилось 36 слоев обратной засыпки.

Моделирование устройства свай в ПК GenIDE32 выполнялось постановкой условия для КЭ свай — «изменение удельного веса». В зону расположения сваи вводились расчетные параметры ее материала и приращение величины удельного веса: $d_y = \gamma_b - \gamma_{gr}$, где γ_{gr} — средневзвешенное значение удельного веса грунтов в месте сваи; γ_b — удельный вес бетона.

Результаты расчетов показали, что учет технологии устройства элементов системы дает более низкие значения максимальных расчетных величин (табл. 2).

Графически результаты определения значимых величин в элементах системы для схемы расчета 3 приведены на рис. 2 и 3.

Следует отметить, что смещения арки выше её пяты имеют разные направления в зависимости от принятой схемы расчета. При мгновенном возведении системы сразу нагружается вся поверхность трубы, а при последовательном возведении нагружение поверхности трубы производится снизу-вверх, что сказывается на направлении смещений.

Последствия такого нагружения можно увидеть на графике «вектор смещений–этапы нагружения» для узлов верха и пяты арки (рис. 4).

Закключение

Анализ и критериальные оценки результатов исследований НДС системы «МГТ–основание–насыпь», выполненные на основе расчетов по программам «Лира» и «GenIDE32», показывают, что при расчете:

- в упругой постановке (мгновенное возведение системы) условия по прочности материала трубы не выполняются:

$$\sigma_{\max} = -313,027 \text{ МПа} > R_{yn} = 300/1,05 = 285,7 \text{ МПа (Лира) (табл. 2);}$$

$$\sigma_{\max} = 355,397 \text{ МПа} > R_{yn} = 300/1,05 = 285,7 \text{ МПа (GenIDE32) (см. табл. 2);}$$

Таблица 2

Результаты расчета по принятым схемам 1, 2, 3 (экстремальные значения)

Расчетные величины в сечениях арки	ЛИРА	GenIDE32	ЛИРА	GenIDE32	ЛИРА	GenIDE32
	1	1	2	2	3	3
Продольные силы $N_{\max}$, МН/м	-5,75661 (0,138)	6,252 (0,20)	-5,94399 (0,138)	5,562 (0,20)	-5,16625 (0,138)	4,815 (0,20)
Поперечные силы $T_{\max}$, МН/м	0,19703 (7,6722)	0,4379 (0,20)	-0,30287 (7,6722)	0,4096 (0,20)	-0,24125 (7,547)	0,2646 (0,20)
Моменты $M_{\max}$, МНм/м	-0,09287 (7,547)	0,1349 (0,40)	-0,16742 (1,373)	0,1380 (0,40)	-0,13874 (7,547)	0,1021 (1,60)
Нормальные напряжения $\sigma_{\max}$, МПа	-313,0274 (0,688)	355,397 (1,94)	-399,136 (1,2362)	332,851 (1,94)	-341,1853 (1,2363)	263,417 (1,60)
Горизонтальное смещение u_x , м	-0,0028 (0,00)	0,011 (3,51)	0,00742 (2,727)	0,010 (3,51)	-0,0083 (0,00)	-0,005 (,00)
Вертикальное смещение u_y , м	-0,0223 (10,041)	-0,034 (9,06)	-0,0269 (8,948)	-0,032 (9,06)	-0,0224 (9,123)	-0,025 (9,06)

Примечание: 1) в скобках даны значения вертикальной координаты Y (м) рассматриваемого конечного элемента (центр тяжести) или узла, считая, что в шарнире $Y = 0,00$ м; 2) смещения вправо от оси арки считаются положительными; 3) нормальные напряжения подсчитывались с учетом продольной силы и изгибающего момента.

Рис. 2. Результаты расчета в упругопластической постановке (последовательное возведение): а — эпюра продольных сил ПК GenIDE32, МН/м; б — эпюра перерезывающих сил ПК GenIDE32, МН/м; в — эпюра моментов ПК GenIDE32, МНм/м; г — эпюра продольных сил ПК Лира, МН/м; д — эпюра перерезывающих сил ПК Лира, МН/м; е) эпюра моментов ПК Лира, МНм/м

Рис. 3. Результаты расчета в упругопластической постановке (последовательное возведение): а — эпюра нормальных напряжений ПК GenIDE32, МПа; б — значения вектора горизонтальных смещений u_x , м ПК GenIDE32; в — значения вектора вертикальных смещений u_y , м ПК GenIDE32; г — изополя горизонтальных смещений u_x ПК Лира, мм; д — изополя вертикальных смещений u_y ПК Лира, мм; е — исходная + деформированная схемы ПК Лира

Рис. 4. Графики зависимости: а — « u — этап возведения» в уровне верха, м ПК GenIDE32; б — « u — этап возведения» в пята арки, м ПК GenIDE32; в — графики зависимости « u — этап возведения» в узлах, мм ПК Лира; г — положение характерных точек ПК Лира

• в упругопластической постановке (мгновенное возведение системы) условия по прочности материала трубы не выполняются:

$$\sigma_{\max} = -399,136 \text{ МПа} > R_{\text{yn}} = 300/1,05 = 285 \text{ МПа} \text{ (Лира) (см. табл. 2);}$$

$$\sigma_{\max} = 332,851 \text{ МПа} > R_{\text{yn}} = 300/1,05 = 285,7 \text{ МПа} \text{ (GenIDE32) (см. табл. 2);}$$

• при расчете в упругопластической постановке с учетом технологии возведения системы в ПК «ЛИРА» условия прочности материала арки не выполняются:

$$\sigma_{\max} = 412,32 \text{ МПа} > R_{\text{yn}} = 300/1,05 = 285,7 \text{ МПа} \text{ (при } \gamma_{fc} = 1,3) \text{ (табл. 2, 3);}$$

$$\sigma_{\max} = 341,19 \text{ МПа} > R_{\text{yn}} = 300/1,05 = 285,7 \text{ МПа} \text{ (при } \gamma_{fc} = 1,1) \text{ (табл. 2, 3).}$$

• при расчете программой GenIDE32 условия прочности выполняются при коэффициенте надежности по нагрузке 1,10:

$$\sigma_{\max} = 263,47 \text{ МПа} < R_{\text{yn}} = 300/1,05 = 285,7 \text{ МПа} \text{ (см. табл. 2, 3);}$$

не выполняются при $\gamma_{fc} = 1,3$:

$$\sigma_{\max} = 310,82 \text{ МПа} > R_{\text{yn}} = 300/1,05 = 285,7 \text{ МПа} \text{ (см. табл. 2, 3).}$$

Необходимо моделировать последовательность возведения сооружений данного типа (учет генетической нелинейности), что дает основания надеяться на более точные результаты. Кроме того, позволяет учесть возможность возникновения максимальных напряжений в МГТ в процессе отсыпки грунтовой обоймы.

В данной задаче нормальные напряжения возрастают почти линейно в процесс засыпки выше короны арки (после 17-го этапа нагружения, рис. 5) и стадия «разгрузки» не наступает [8]. Напряжения достигают минимального значения, когда арка, нагруженная собственным весом, подпирается грунтовой обоймой и грунт воспринимает на себя часть нагрузки (8 этап),

см. рис. 5. Моделирование стадий загрузки также позволяет определить оптимальный уровень засыпки над трубой.

Расчет подобного объекта в ПК ANSYS с учетом нагрузки от подвижного состава приведен в работе [9].

Моделирование взаимодействия трубы и грунта как контактного может быть реализо-

Таблица 3

Результаты расчета в ПК Лира и GenIDE32

Показатель	Ед. изм.	ЛИРА ($\gamma_{fc} = 1,3$) Упругопластический расчет, последовательное возведение		ЛИРА ($\gamma_{fc} = 1,1$) Упругопластический расчет, последовательное возведение		GenIDE32 ($\gamma_{fc} = 1,3$) Упругопластический расчет, последовательное возведение		GenIDE32 ($\gamma_{fc} = 1,1$) Упругопластический расчет, последовательное возведение	
		опасное сеч. ($x = 7,46$ м, $y = 4,12$ м)	пята арки ($x = 6,811$ м, $y = 0$ м)	опасное сеч. ($x = 6,74$ м, $y = 1,24$ м)	пята арки ($x = 6,811$ м, $y = 0$ м)	опасное сеч. ($x = 6,675$ м, $y = 1,781$ м)	пята арки ($x = 6,811$ м, $y = 0$ м)	опасное сеч. ($x = 6,75$ м, $y = 1,781$ м)	пята арки ($x = 6,811$ м, $y = 0$ м)
Напряжение σ	МПа	-412,32	-292,70	-341,19	-235,86	-310,82	-259,92	263,47	220,52
Продольная сила N	МН/м	-4,091	-6,404	-5,001	-5,161	-5,362	-5,687	-4,549	-4,825
Поперечная сила Q	МН/м	0,2813	0,1981	0,0219	0,2023	0,03415	0,3097	0,0243	0,264
Изгибающий момент M	МНм/м	-0,2761	0	-0,138	0	-0,0806	0	0,0678	0

Рис. 5. Графики изменения: а — изгибающий момент; б — продольные силы; в — нормальные напряжения; г — характерные точки в зависимости от стадии возведения

вано, например, с использованием контактного слоя конечных элементов [10, 11], либо с использованием линейной задачи дополнителности [12]. Учет сил трения может повлиять на распределение усилий в арке.

Для получения более полной картины о достоверности полученных результатов необходимо наличие экспериментальных данных [13–15].

Библиографический список

1. Handbook of steel drainage and highway construction products. Published by Corrugated Steel Pipe Institute, American Iron and Steel Institute. 2002, 470p. 125 Lysmer J., Seed H. B. Soil-structure interaction analyses by limit elements state of the art // «Nucl. Eng. and Des.» 1978. 46. N 2.
2. Герцог А. А. Гофрированные трубы на автомобильных дорогах. М.: Гущосдор, 1939. 112 с.
3. Колоколов Н. М., Янковский О. А., Щербина К. Б., Черняховская С. Э. Металлические гофрированные трубы под насыпями. М.: Транспорт, 1973. 117 с.
4. Городецкий А. С., Евзеров И. Д. Компьютерные модели конструкции. Киев: Факт, 2005. 344 с.
5. Мгалобелов Ю. Б. Прочность и устойчивость скальных оснований бетонных плотин. М.: Энергия. 1979. 216 с.
6. Петрова Е. Н. Исследования сооружений из металлических гофрированных элементов // Наука и техника в дорожной отрасли. 2012. № 1. С. 26–28.
7. Damian Beben Behaviour of corrugated plate culvert under backfilling loads / Damian Beben, Zbigniew Manko // Steel Construction 2(2009), No. 3, pp. 188–202.
8. Ловцов А. Д., Попов А. Н. Разгружающий эффект бокового давления грунта для большепролетных водопропускных труб // Материалы секционных заседаний 54-й студенческой науч.-техн. конф. ТОГУ. Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2014. С. 140–144.
9. Лебедева Т. Б., Селина Т. Л., Беляев В. С., Привалов С. Ю., Михайловский Л. Е. Практика применения металлических гофрированных конструкций в хабаровском филиале ОАО «ГИПРОДОР-НИИ» // Вопросы проектирования и строительства автомобильных дорог: опыт и инновации: сб. науч. тр. Екатеринбург, 2010. № 1. С. 162–175.
10. Петрова. Е. Н. Проектирование и строительство транспортных сооружений из металлических гофрированных элементов. М.: МАДИ, 2012. 56 с.
11. Damian Beben Numerical analysis of a soil-steel bridge structure / The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering 4(1):13–21. · March 2009.

12. Ловцов А. Д., Фёдорова В. С. Расчет гофрированной водопропускной трубы как арки, взаимодействующей с упругой средой посредством трения Кулона // Новые идеи нового века — 2013: материалы XIII Международной научной конференции = The New Ideas Of New Century 2013: The Thirteenth International Scientific Conference Proceedings: в 3 т. / Тихоокеанский гос. ун-т. Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2013. Т. 2. С. 469–474.

13. Овчинников И. Г., Беляев В. С., Яковлев Л. С., Осокин И. А. Анализ экспериментальных исследований поведения металлических гофрированных конструкций под воздействием статических и динамических нагрузок с учетом их совместной работы с окружающим грунтом Часть 1. Обзор и анализ зарубежных статических экспериментальных исследований // Интернет-журнал «Науковедение». 2013. № 6 (19). М-2013. URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/130TVN613.pdf>

14. Беляев В. С., Яковлев Л. С., Овчинников И. Г., Осокин И. А. Анализ экспериментальных исследований поведения металлических гофрированных конструкций под воздействием статических и динамических нагрузок с учетом их совместной работы с окружающим грунтом. Ч. 2. Обзор отечественных экспериментальных исследований. Сопоставление результатов эксперимента с результатами расчетов по разным методикам // Интернет-журнал «Науковедение». 2013. № 6 (19). М-2013. URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/190TVN613.pdf>

15. Mak A. C., Drachman R. W. I. and Moore I. D. Measured response of a deeply corrugated box culvert to three dimensional surface loads: Transportation Research Board Annual Conference // Washington D.C., 2009. Paper No 09-3016. 14 p.

References

1. Handbook of steel drainage and highway construction products. Corrugated Steel Pipe Institute, American Iron and Steel Institute Publ., 2002, 470 p. Lysmer J., Seed H.B. Soil-structure interaction analyses by limit elements state of the art. Nucl. Eng. and Des., 1978, 46, no. 2.
2. Gertsog A. A. Gofrirovannye trubyny na avtomobil'nykh dorogakh [Corrugated pipe on the roads]. Moscow, Gushosdor Publ., 1939, 112 p.
3. Kolokolov N. M., Yankovskiy O. A., Shcherbina K. B., Chernyakhovskaya S. Eh. Metallicheskie gofrirovannye trubyny pod nasypyami [Corrugated metal pipes under embankments]. Moscow, Transport Publ., 1973, 117 p.
4. Gorodetskiy A. S., Evzerov I. D. Komp'yuternye modeli konstruktsey [Computer models of the design]. Kiev, Fakt Publ., 2005, 344 p.

5. Mgalobelov Yu. B. *Prochnost' i ustoychivost' skal'nykh osnovaniy betonnykh plotin* [Strength and stability of rock foundations of concrete dams]. Moscow, Ehnergiya Publ., 1979, 216 p.
6. Petrova E. N. *Issledovaniya sooruzheniy iz metallicheskih gofirovannykh ehlementov* [Research of structures made of corrugated metal elements]. *Nauka i tekhnika v dorozhnoy otrasli – Science and technology in the road industry*, 2012, no. 1, pp. 26–28.
7. Damian Beben. Behaviour of corrugated plate culvert under backfilling loads. *Steel Construction*, 2009, no. 2(3), pp. 188–202.
8. Lovtsov A. D., Popov A. N. *Razgruzhayushchiy ehffekt bokovogo davleniya grunta dlya bol'sheproletnykh vodopropusknykh trub* [Unloading effect of lateral ground pressure for large-span culverts]. *Trudy 54-y studencheskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii TOGU* [Proc. of the 54-th student scientific and technical conference of PNU]. Khabarovsk, PNU Publ., 2014, pp. 140 – 144.
9. Lebedeva T. B., et al. *Praktika primeneniya metallicheskih gofirovannykh konstruksiy v khabarovskom filiale OAO «GIPRODOR-NII»* [Practice of use of metal corrugated structures in the Khabarovsk branch of the OJSC “GIPROGOR-NII”]. Sb. nauch. tr. «Voprosy proektirovaniya i stroitel'stva avtomobil'nykh dorog: opyt i innovatsii» [Coll. works “Issues of designing and construction of roads: experiences and innovations”]. Ekaterinburg, 2010, no. 1, pp. 162–175.
10. Petrova E. N. *Proektirovanie i stroitel'stvo transportnykh sooruzheniy iz metallicheskih gofirovannykh ehlementov* [Design and construction of transport facilities made of corrugated metal elements]. Moscow, MADI Publ., 2012, 56 p.
11. Damian Beben. Numerical analysis of a soil-steel bridge structure. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 2009, March, no. 4(1), pp. 13–21.
12. Lovtsov A. D., Fyodorova V. S. *Raschet gofirovannoy vodopropusknoy truby kak arki, vzaimodeystviyushchey s uprugoy sredoy posredstvom treniya Kulona* [Calculation of corrugated culvert as an arch interacting with elastic medium by Coulomb friction]. *Trudy XIII Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii «Novye idei novogo veka — 2013»* [Proc. of the XIII Int. Sci. Conf. “New Ideas of New Century — 2013”]. Khabarovsk, PNU Publ., 2013, vol. 2, pp. 469–474.
13. Ovchinnikov I. G., Belyaev V. S., Yakovlev L. S., Osokin I. A. *Analiz ehksperimental'nykh issledovaniy povedeniya metallicheskih gofirovannykh konstruksiy pod vozdeystviem staticheskikh i dinamicheskikh nagruzok s uchetom ikh sovmestnoy raboty s okruzhayushchim gruntom Chast' 1. Obzor i analiz zarubezhnykh staticheskikh ehksperimental'nykh issledovaniy* [Analysis of experimental studies of the behavior of corrugated metal structures under the influence of static and dynamic loads, taking into account their joint work with the surrounding soil Part 1. Review and analysis of foreign static experimental studies]. *Internet-zhurnal «Naukovedenie» – Internet journal “Science of Science”*, 2013, no. 6 (19). Available at: <http://naukovedenie.ru/PDF/130TVN613.pdf>
14. Belyaev V. S., Yakovlev L. S., Ovchinnikov I. G., Osokin I. A. *Analiz ehksperimental'nykh issledovaniy povedeniya metallicheskih gofirovannykh konstruksiy pod vozdeystviem staticheskikh i dinamicheskikh nagruzok s uchetom ikh sovmestnoy raboty s okruzhayushchim gruntom. Ch. 2. Obzor otechestvennykh ehksperimental'nykh issledovaniy. Sopostavlenie rezul'tatov ehksperimenta s rezul'tatami raschetov po raznym metodikam* [Analysis of experimental studies of the behavior of corrugated metal structures under the influence of static and dynamic loads, taking into account their joint work with the surrounding soil. Part 2. Review of domestic experimental studies. Comparison of experimental results with the results of calculations by different methods]. *Internet-zhurnal «Naukovedenie» – Internet journal “Science of Science”*, 2013, no. 6 (19). Available at: <http://naukovedenie.ru/PDF/190TVN613.pdf>
15. Mak A. C., Drachman R. W. I. and Moore I. D. Measured response of a deeply corrugated box culvert to three dimensional surface loads. *Proc. of the Transportation Research Board Annual Conference*, Washington D.C., 2009, Paper no 09-3016, 14 p.