

DOI 10.15593/24111678/2017.04.06

УДК 624.6.014.2

А.С. Гришина, А.С. БиринПермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь, Россия

АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ВОДОПРОПУСКНОГО СООРУЖЕНИЯ ИЗ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ГОФРИРОВАННЫХ СТРУКТУР

Целью данной работы является исследование напряженно-деформированного состояния водопропускной металлической гофрированной конструкции. Подобные конструкции могут применяться как альтернатива жестким пролетным строениям, но отсутствие опыта на стадии проектирования, строительства и эксплуатации, а также недостаточность нормативной литературы в этой области существенно осложняют их применение в транспортном строительстве. Одним из основных вопросов при этом является расчет напряженно-деформированного состояния сооружения. Представленное исследование направлено в большей степени на расширение научной базы по данному вопросу, поскольку полученные результаты требуют более детального изучения в дальнейшем. В статье приведены результаты численного моделирования арочного заглубленного сооружения круглого очертания диаметром 6 м с размерами гофра 381×140 мм в программном комплексе Midas GTS NX. Выполнено сравнение плоских и трехмерных конечно-элементных моделей, оценено влияние способов их построения на конечные результаты расчетов напряженно-деформированного состояния конструкции. На основании экспериментальных данных по результатам исследований других авторов, приведенных в соответствующих статьях, выполнен сравнительный анализ значений деформаций в различных точках конструкции, а также значений продольной силы и изгибающего момента, возникающих в сечении конструкции при различных величинах нагрузки. Сделаны выводы об адекватности моделей, и оценена погрешность результатов расчета. Для дальнейшей верификации полученных данных требуется проведение ряда исследований, в том числе экспериментальных, для конструкций различных очертаний, с различными вариантами профиля гофра и материала обратной засыпки в условиях статического и динамического нагружения.

Ключевые слова: водопропускное сооружение, металлическая гофрированная конструкция, арочная конструкция, метод конечных элементов.

A.S. Grishina, A.S. BirinPerm National Research Polytechnic University,
Perm, Russian Federation

ANALYSIS OF THE STRAIN-STRESS STATE OF A METAL CORRUGATED CULVERT

The purpose of this study is to investigate the stress-strain state of a culvert metal corrugated structure. Such structures may be used as an alternative to rigid span structures, and bridges. However, the lack of experience in design, construction and maintenance, as well as the inadequacy of regulatory literature in this area, strongly complicates the use of metal corrugated structures in transport construc-

tion. One of the main questions in this case is the calculation of strain-stress state of a construction. The presented research is aimed at increasing the theoretical base on this issue, since the results require more study in the future. In this paper the results of a numerical analysis of a round arch structure with a diameter of 6 meters, with dimensions of the corrugation 381x140 mm in the finiteelementMidas GTS NX software complex are presented. A comparison of two-dimensional and three-dimensional finite element models has been performed and the influence of construction methods on the results of calculations of the stress-strain state of the structure has been estimated. Based on the other authors' experimental data, a comparative analysis of the values of deformations at various points of the structure, and the longitudinal force and bending moment arising in a section of the structure have been performed for different load values. The conclusions about the adequacy of models have been drawn and the calculating errors have been estimated. To further verify the data obtained, it is required to conduct a number of studies, including experimental ones for structures of various shapes, with different corrugation profiles and backfill material under static and dynamic loading.

Keywords: culvert, metal corrugated structure, arch construction, finite element method.

Введение

В настоящее время во всем мире на автомобильных и железных дорогах активно применяются водопропускные сооружения и путепроводы из металлических гофрированных структур (МГС). Подобные сооружения могут быть использованы в качестве альтернативы жестким бетонным или металлическим пролетным строениям. При этом металлические гофрированные конструкции (МГК) способны отвечать требованиям конструктивной безопасности наравне с традиционными мостами при существенно меньших затратах на строительство, особенно при использовании современных геосинтетических материалов в теле грунта обратной засыпки [1–4].

Одним из удачных примеров использования МГК является реконструкция транспортной развязки на площади Восстания в г. Перми в 2016 г. Два железобетонных моста по улицам Мостовой и Соликамской были заменены на мосты из металлических гофрированных структур пролетом более 6 м (рис. 1) [5].



Рис. 1. Водопропускное сооружение из металлических гофрированных структур

Особенностью таких сооружений является малая поперечная жесткость, ввиду чего в них могут возникать значительные деформации от действия внешних нагрузок. Однако деформации гофрированной конструкции, находящейся в окружении массива грунта, ограничены таким взаимодействием, в этом суть высокой эффективности таких сооружений.

В отличие от зарубежных стран, в России подобные сооружения не получили широкого распространения. Конструкции из МГС являются гораздо более чувствительными к качеству проектирования и выполнения строительного-монтажных работ по сравнению с жесткими пролетными сооружениями, а почти полное отсутствие нормативной литературы по данному вопросу, а также нехватка опыта при проектировании, строительстве и эксплуатации существенно ограничивают применение МГС [6, 7].

Особое место в области проектирования МКЗ занимает вопрос расчета НДС конструкции. Учеными были предложены различные методики расчета конструкций из МГС [8–12]. При этом наиболее перспективными являются методы расчетов с использованием программных комплексов, в частности метод конечных элементов.

Целями данного исследования являются изучение НДС конструкции и анализ способов расчетов инструментами программного конечно-элементного комплекса Midas GTS NX.

1. Объект исследования

В качестве объекта исследования выступает арочная металлическая гофрированная конструкция круглого очертания с размерами гофра 381×140 мм, толщиной 7 мм, производства ЗАО «Гофрсталь», испытанная в 2012 г. Подробный ход эксперимента приведен в работе [13]. Сложность анализу результатов испытания добавляет тот факт, что во время его не была соблюдена симметричность нагружения. Грунтовая обойма была неравномерно уплотнена, что, в свою очередь, привело к перераспределению напряжений в конструкции.

2. Численное моделирование

Конструкция была смоделирована с использованием двух- (рис. 2) и трехмерной (рис. 3) конечно-элементных моделей в программном комплексе Midas GTS NX.

Грунтовый массив двухмерной модели был смоделирован элементами плоской деформации (plane strain element) – 8-узловыми че-

тырехугольниками с толщиной, равной половине конструкции в направлении нормали к плоскости сечения сооружения. Элементы гофрированной оболочки были смоделированы балочными элементами.

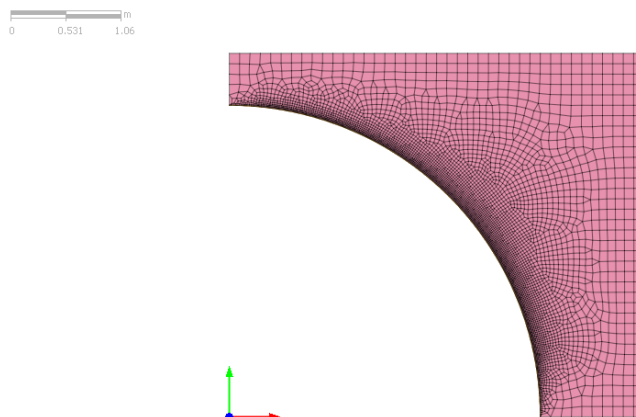


Рис. 2. Плоская расчетная модель МГК

Грунтовый массив трехмерных моделей был смоделирован твердотельными элементами (solid elements), преимущественно 8-узловыми гексаэдрами. Элементы гофрированной оболочки были заданы двумя методами: твердотельными элементами (20-узловыми гексаэдрами) и оболочечными элементами (8-узловыми прямоугольниками). Поскольку различий в результатах расчета для твердотельных и оболочечных элементов конструкции практически не наблюдалось, результаты расчета представлены только для оболочечных элементов. Это касается как гофрированной, так и ортотропной моделей.

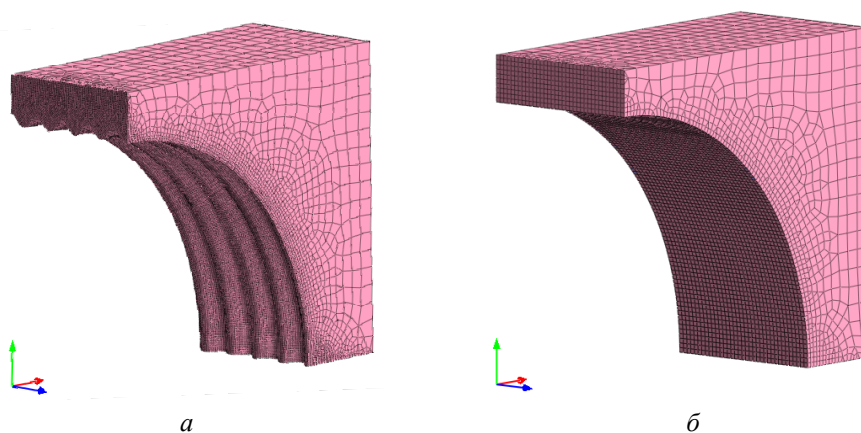


Рис. 3. Трехмерная расчетная модель: *а* – гофрированная; *б* – ортотропная

Для двухмерного анализа конструкция была задана балочным элементом двумя способами: непосредственным вводом геометрических характеристик и с использованием балочного элемента эквивалентной толщины t' и эквивалентного модуля упругости E' :

$$t' = \sqrt{\frac{12I}{E}},$$

$$E' = \frac{12EI}{t'^3}.$$

Для трехмерного анализа характеристики были заданы также двумя способами: прямым моделированием гофрирования и ортотропной оболочкой [5] с использованием эквивалентной толщины оболочки

$$t' = d \sqrt{\frac{3}{2 \left(1 + \frac{p^2 \cdot d^2}{4b^2} \right)}},$$

эквивалентного модуля упругости в окружном направлении

$$E_6 = \frac{3}{2} \left(1 + \frac{p^2 \cdot d^2}{8b^2} \right) \frac{E \cdot t}{d} \left[\frac{2}{3} \left(1 + \frac{p^2 \cdot d^2}{4b^2} \right) \right]^{3/2},$$

эквивалентного модуля упругости в осевом направлении

$$E_z = \frac{2}{3} E \left(\frac{t}{d} \right)^3 \sqrt{\frac{2}{3} \left(1 + \frac{p^2 \cdot d^2}{4b^2} \right)^3},$$

эквивалентного модуля сдвига для местных координат элемента x - y и x - z

$$G'_{xy, xz} = \frac{G \cdot t}{d} \sqrt{\frac{2}{3 \left(1 + \frac{p^2 \cdot d^2}{4b^2} \right)}}$$

и эквивалентного модуля сдвига для местных координат элемента y - z [14, 15]

$$G'_{yz} = G \left(\frac{t}{d} \right)^3 \left(\frac{2}{3} \right)^{3/2} \left(1 + \frac{p^2 \cdot d^2}{4b^2} \right)^{5/2}.$$

Грунтовая обойма представляет собой упругопластическую модель с критерием прочности Мора–Кулона. Узлы конструкции и массива грунта соединены жестко, без интерфейсных элементов. Эффект уплотнения обоймы грунта во время обратной засыпки не учитывался. Из-за свойств симметрии была смоделирована четверть конструкции. Входные параметры для моделей представлены в табл. 1, 2.

Таблица 1

Значение физико-механических свойств материала гофрированной структуры

Модель	Характеристика	Значение
Двухмерная	Площадь поперечного сечения на единицу длины A	2126,19 см ⁴ /м
	Момент инерции сечения на единицу длины I	90,65 см ⁴ /м
	Модуль упругости стали E	210 000 МПа
Двухмерная эквивалентной толщины	Эквивалентная толщина t'	167,77 мм
	Эквивалентный модуль упругости E'	11347,0 МПа
Гофрированная	Толщина оболочки t	7 мм
	Модуль упругости стали E	210 000 МПа
	Коэффициент Пуассона ν	0,3
Трехмерная ортотропная	Эквивалентная толщина t'	148,5 мм
	Эквивалентный модуль упругости в окружном направлении E_a	15394,9 МПа
	Эквивалентный модуль упругости в осевом направлении E_z	21,9 МПа
	Эквивалентный модуль сдвига 1–2, 1–3 (G_{1-2} , G_{1-3})	2855,8 МПа
	Эквивалентный модуль сдвига 2–3 (G_{2-3})	11,28 МПа
	Коэффициент Пуассона ν	0

Таблица 2

Значение физико-механических свойств грунтов

Характеристика	Значение
Удельный вес γ	20 кН/м
Модуль деформации E	22,2 МПа
Коэффициент Пуассона ν	0,3
Угол внутреннего трения ϕ	37°
Удельное сцепление C	5 кПа

3. Результаты численного моделирования

По результатам расчета были получены значения перемещений, изгибающего момента и продольной силы для нагрузок, соответствующих 12,5; 20; 30 м условного грунта насыпи. Результаты расчета представлены на рис. 4–6.

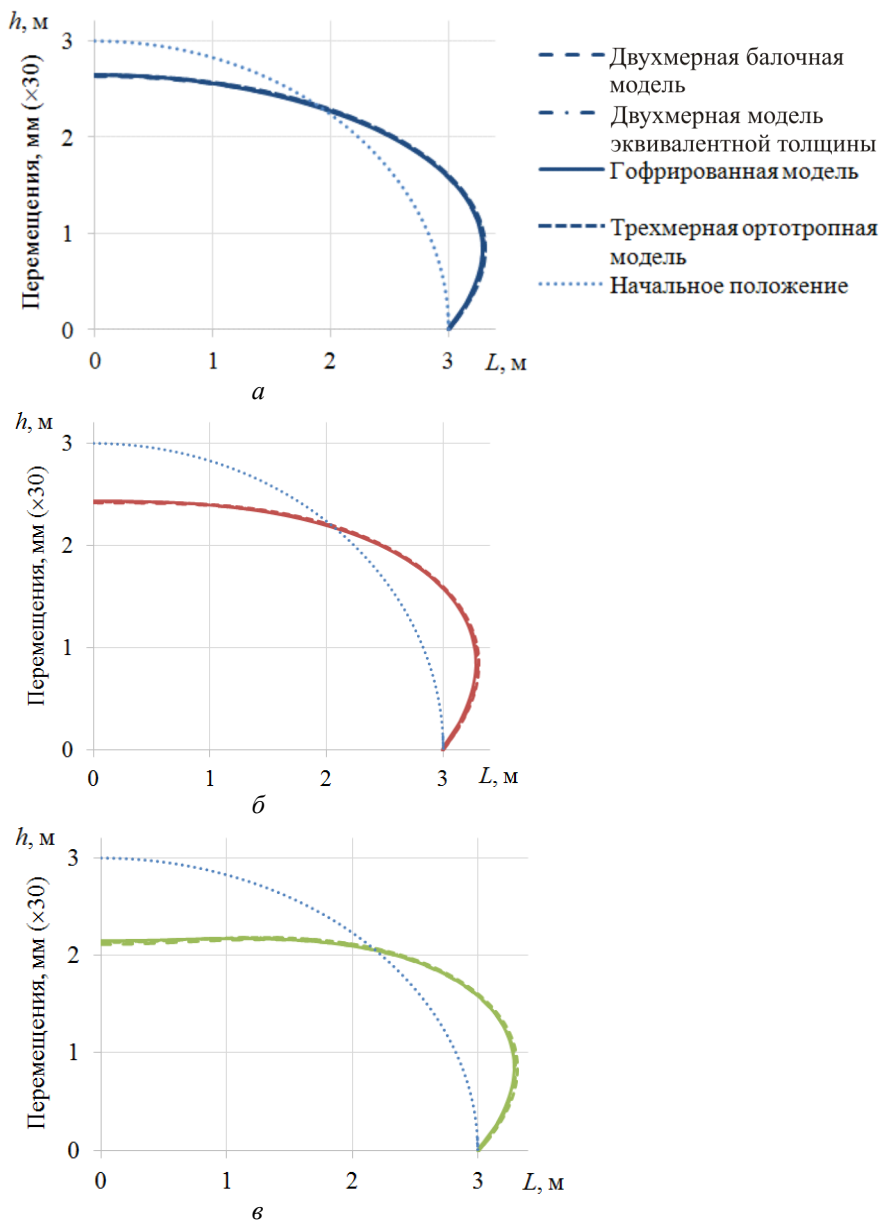


Рис. 4. Перемещения конструкции под нагрузкой, соответствующей высоте засыпки: а – 12,5 м; б – 20 м; в – 30 м

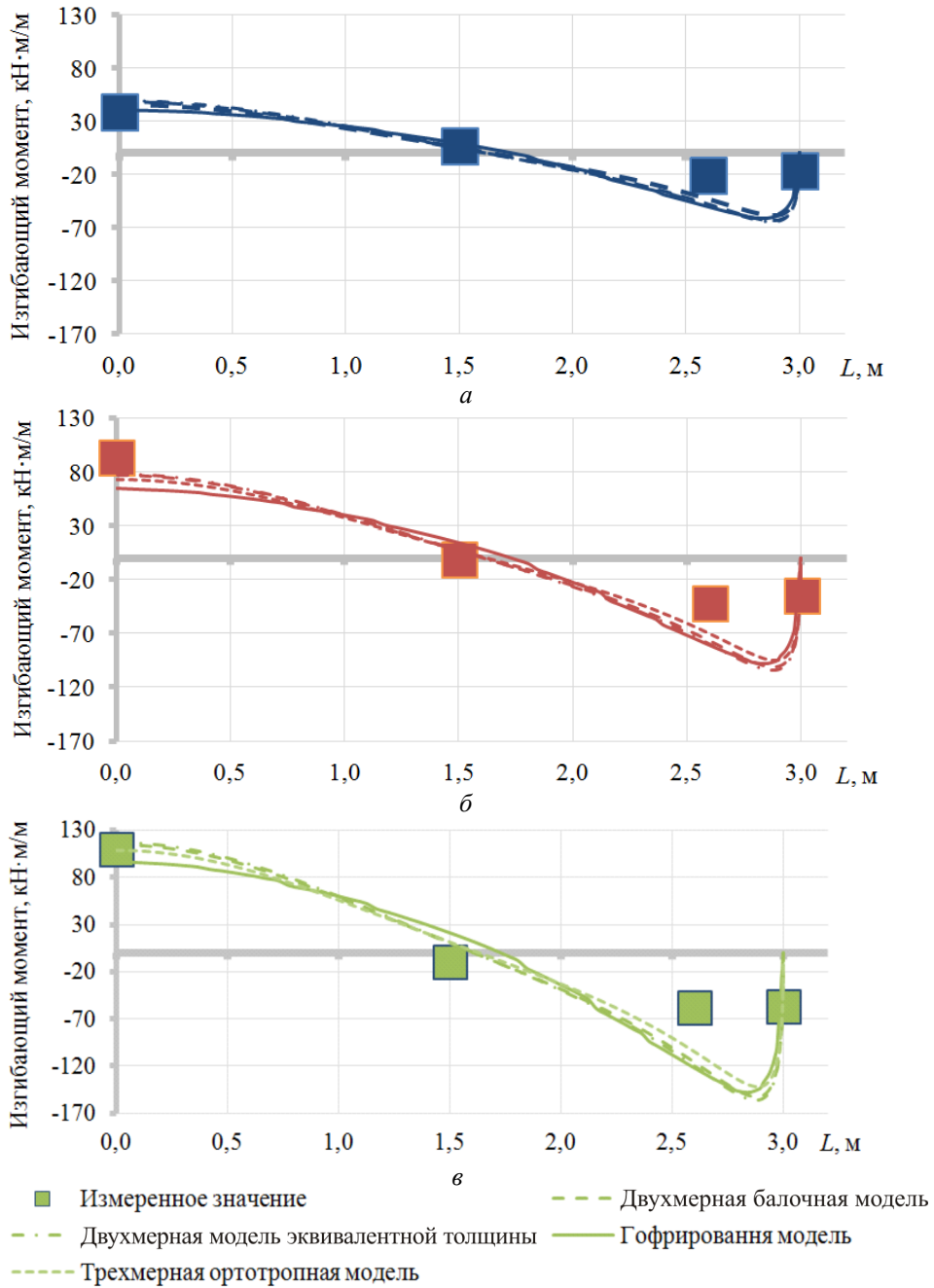


Рис. 5. Изгибающий момент в структуре под нагрузкой, соответствующей высоте засыпки: а – 12,5 м; б – 20 м; в – 30 м

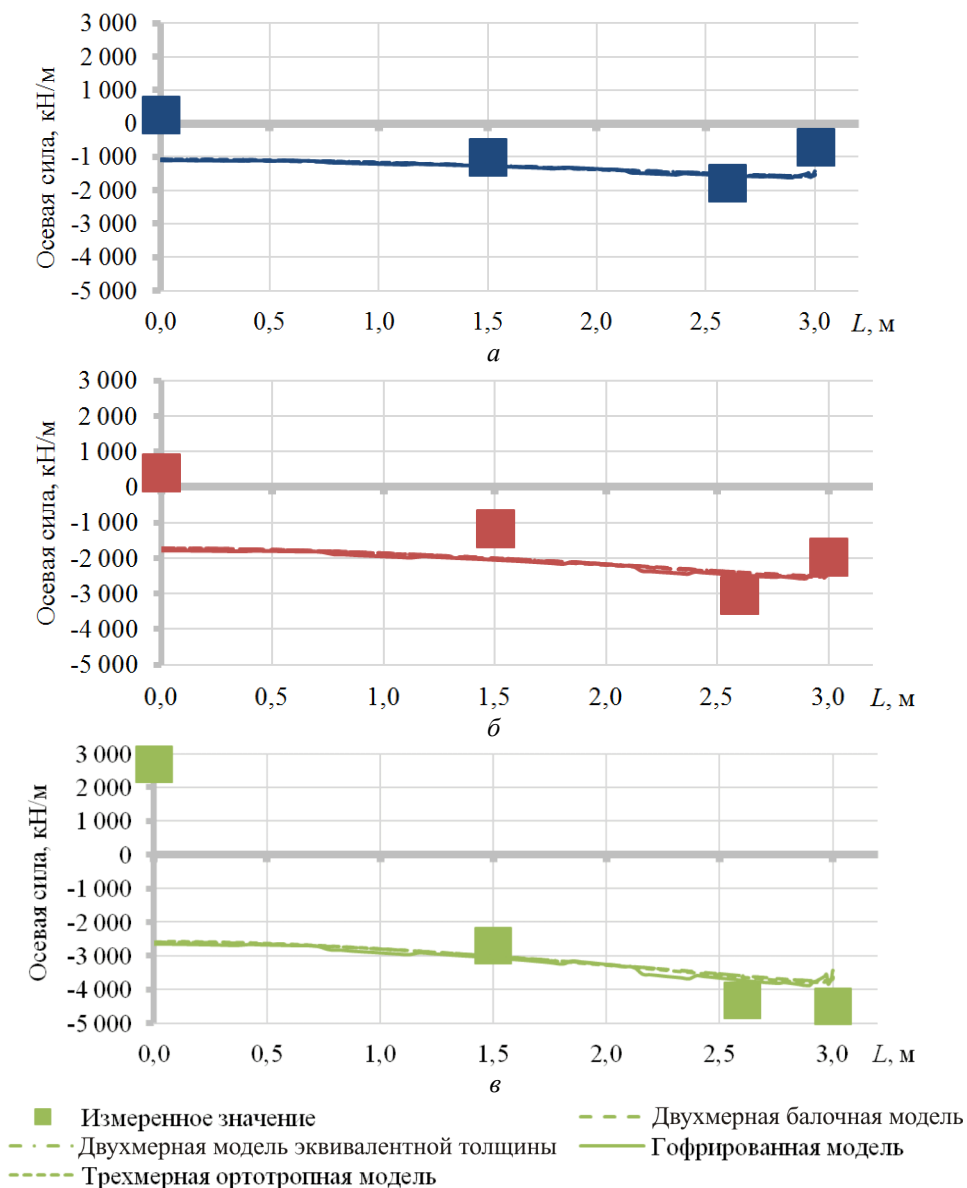


Рис. 6. Осевая сила в структуре под нагрузкой, соответствующей высоте засыпки: *а* – 12,5 м; *б* – 20 м; *в* – 30 м

4. Анализ результатов численного моделирования

Результаты численного моделирования для всех моделей показали очень близкий результат, но значительно разошлись с результатами натурного эксперимента. Особенно большая разница наблюдается в полученных значениях перемещений. Экспериментальные значения значительно превышают значения, полученные в результате численного

моделирования. Различия в результатах можно объяснить податливостью болтового соединения в местах сопряжения гофрированных листов и пластическим течением под высокой нагрузкой. Горизонтальные перемещения не зависели от интенсивности нагрузки и не превышали 0,4 % от величины пролета конструкции.

Значения изгибающего момента в замке конструкции в гофрированной и трехмерной ортотропной моделях оказались несколько ниже по сравнению с другими моделями, при этом разница усиливалась с увеличением нагрузки. Экспериментальное значение максимального изгибающего момента в плечах конструкции оказалось в среднем на 50 % меньше по сравнению с численным моделированием.

Разность значения продольной силы для всех моделей не превысила 3 %. Значительное различие с экспериментом наблюдается только в замке, при этом продольная сила, что странно, приобретает положительный знак.

Исходя из полученных результатов, можно сказать, что использование метода конечных элементов при расчете заглубленного гофрированного сооружения не в полной мере отражает работу такого сооружения в действительности.

По результатам эксперимента можно сделать вывод, что для определения усилий в конструкции можно применять различные методы расчета. Усложнение модели не приводит к значительным изменениям НДС. Все модели имеют как свои преимущества, так и недостатки. Например, для ортотропной трехмерной модели при использовании гофрированных листов, отличных от рассмотренных в статье, потребуется пересчет характеристик, что может вызвать некоторые сложности. В гофрированной трехмерной модели количество конечных элементов может достигать до слишком большого значения, что приведет к очень большой размерности задачи. Плоские модели могут учитывать только геометрическую нелинейность, что при более полном анализе может привести к искажению результатов.

Выводы

1. Для арочной конструкции круглого очертания все рассмотренные способы численного моделирования показали схожий результат.
2. Использование «простых» моделей позволяет получить схожий по сравнению со «сложными» моделями результат за меньшее время. Однако при этом приоритет лучше отдавать «сложным» моделям, по-

скольку время вычисления в обоих случаях оказывается приемлемым, а качество модели при этом существенно возрастает.

3. Изгибающий момент в замке конструкции для гофрированной модели оказался ниже значений для других моделей. С увеличением нагрузки разница увеличивается. Различия в величине изгибающего момента в эксперименте можно объяснить появлением пластических деформации и потерей устойчивости отдельных элементов конструкции в наиболее нагруженном сечении.

4. Величина горизонтальных перемещений практически не зависит от величины нагрузки. Большое различие с результатами эксперимента можно объяснить податливостью узлов соединения гофрированных листов.

5. Для верификации и калибровки предложенных моделей требуется дальнейшее проведение исследований, в том числе экспериментальных.

Список литературы

1. Моисеева О.В., Клевко В.И. Учет безопасности движения пешеходов и стоимости строительства при выборе рационального типа пешеходного перехода // Мир науки и инноваций. – 2015. – Т. 8, № 2 (2). – С. 90–93.

2. Свечников Е.А. Армирование грунтовой обоймы металлической гофрированной арки углепластиковыми стержнями // Вестник Моск. автомоб.-дорож. гос. техн. ун-та (МАДИ). – 2015. – № 2 (41). – С. 16.

3. Свечников Е.А., Новак Ю.В., Соколов А.Д. Применение технологии армирования грунта при проектировании насыпных мостов и путепроводов из металлических гофрированных конструкций // Транспортное строительство. – 2015. – № 6. – С. 7–9.

4. Овчинников И.Г., Овчинников И.И. Анализ причин аварий и повреждений транспортных сооружений // Транспортное строительство. – 2010. – № 7. – С. 2–5.

5. Площадь Восстания готовится к открытию движения по постоянной схеме [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.gorodperm.ru/news/2016/09/29/36469-id> (дата обращения: 05.12.2016).

6. Практика применения металлических гофрированных конструкций в хабаровском филиале ОАО «ГИПРОДОРНИИ» / Т.Б. Лебедева [и др.] // Вопросы проектирования и строительства автомобильных дорог: опыт и инновации: сб. науч. тр. – Екатеринбург, 2010. – № 1. – С. 162–175.

7. Осокин И.А., Пермикин А.С. Анализ методик расчета предельных деформаций поперечного сечения гофрированных водопропускных труб // Дороги и мосты. – 2013. – № 2 (30). – С. 224–236.

8. Осокин И.А. Применение теории оболочек вращения к расчету гофрированных водопропускных труб [Электронный ресурс] // Наукоеведение. – 2013. – № 2 (15). – URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/40tvn213.pdf> (дата обращения: 05.12.2016).

9. Власова В.З. К расчету металлических гофрированных конструкций [Электронный ресурс] // Наукоеведение. – 2014. – № 4 (23). – URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/35TVN414.pdf> (дата обращения: 05.12.2016).

10. Новодзинский А.Л., Клевеко В.И. Учет влияния толщины гофрированного элемента на прочность и устойчивость металлической водопропускной трубы // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. – 2012. – № 1. – С. 101–108.

11. Бугаева О.Е. Проектирование обделок транспортных тоннелей. – Л.: ЛИИЖТ, 1996. – 75 с.

12. Beben D. Numerical analysis of a soil-steel bridge structure // The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering. – 2009. – № 4 (1). – P. 13–21.

13. Анализ экспериментальных исследований поведения металлических гофрированных конструкций под воздействием статических и динамических нагрузок с учетом их совместной работы с окружающим грунтом. Часть 2. Обзор отечественных экспериментальных исследований. Сопоставление результатов эксперимента с результатами расчетов по разным методикам [Электронный ресурс] / В.С. Беляев [и др.] // Наукоеведение. – 2013. – № 6 (19). – URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/190TVN613.pdf> (дата обращения: 05.12.2016).

14. Moore I.D., Taleb B. Metal culvert response to earth loading performance of three-dimensional analysis // Transport Research Report. – 1999. – № 1656. – P. 37–44.

15. Brachman R.B., Mak A.C., Moore I.D. Ultimate limit state of a deepcorrugated large-span box culvert // Transportation Research Record. – 2010. – № 2201. – P. 55–61.

References

1. Moiseeva O.V., Kleveko V.I. Uchet bezopasnosti dvizhenija peshehodov i stoimosti stroitel'stva pri vybore racional'nogo tipa peshehodnogo perekoda [Accounting for the safety of pedestrians and construction costs when choosing a rational type of pedestrian crossing]. *World of science and innovation*, 2015, vol. 8, no. 2 (2), pp. 90–93.

2. Svechnikov E.A. Armirovanie gruntovoj obojmy metallicheskoj gofirovannoj arki ugleplastikovymi sterzhnjami [Corrugated steel arch backfill ring reinforcement with fibre-reinforced plastic rebar]. *Vestnik Moskovskogo avtomobil'no-dorozhnogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta (MADI)*, 2015, no. 2(41), pp. 16.

3. Svechnikov E.A., Novak Ju.V., Sokolov A.D. Primenenie tehnologii armirovanija grunta pri proektirovanii zasypnyh mostov i puteprovodov iz metallicheskih gofirovannyh konstrukcij [Application of soil reinforcement technology when designing backfilled bridges and overpasses from corrugated steel structures]. *Transport Construction*, 2015, no. 6, pp. 7-9.

4. Ovchinnikov I.G., Ovchinnikov I.I. Analiz prichin avarij i povrezhdenij transportnyh sooruzhenij [The analysis of the reasons of failures and damages of transport constructions]. *Transport Construction*, Moscow, 2010, no. 7, pp. 2-5.

5. Ploshhad' vosstanija gotovitsja k otkrytiju dvizhenija po postojannoju sheme ["Vosstanija" square is preparing for the opening of the movement on a permanent basis]. Perm City, Russia. Administration of Perm City, available at: <http://www.gorodperm.ru/news/2016/09/29/36469-id> (accessed 05 January 2016).

6. Lebedeva T.B., Selina T.L., Beliaev V.S., Privalov S.Iu., Mihailovski L.E. Praktika primenenija metallicheskih gofirovannyh konstrukcij v habarovskom filiale OAO «GIPRODORNII» [The practice of using metal corrugated structures in the Khabarovsk branch of Jsc Gipprodornii]. *Voprosy proektirovaniya i stroitel'stva avtomobil'nykh dorog: opyt i innovatsii*: collection of scientific papers. Ekaterinburg, 2010, no. 1, pp. 162-175.

7. Osokin I.A., Permikin A.S. Osokin I.A., Permikin A.S. Analiz metodik rascheta predel'nyh deformacij poperechnogo sechenija gofirovannyh vodopropusnyh trub [Analysis of methods for calculating ultimate strains of cross sections of corrugated culverts]. *Dorogi i mosty*, 2013, no. 2(30), pp. 224-236.

8. Osokin I.A. Primenenie teorii obolochek vrashhenija k raschetu gofirovannyh vodopropusnyh trub [Application of the theory of shells of revolution to the calculation of corrugated culverts]. *Naukovedenie*, 2013, no. 2 (15), available at: <http://naukovedenie.ru/PDF/40tvn213.pdf> (accessed 05 January 2016).

9. Ovchinnikov I.G., Osokin I.A. O vozmozhnosti primeneniya teorii polubezmomentnykh obolochek V.Z. Vlasova k raschetu metallicheskih gofrirovannykh konstrukcij [On the possibility of applying the V.Z. Vlasov theory of shells to the analysis of corrugated metal structures]. *Naukovedenie*, Moscow, 2014, no. 4(23), available at: <http://naukovedenie.ru/PDF/35TVN414.pdf> (accessed 05 January 2016).

10. Novodzinskii A.L., Kleveko V.I. Uchet vlijanija tolshhiny gofrirovannogo jelementa na prochnost' i ustojchivost' metallicheskoj vodopropusknoj trubyy [The account influence of a thickness of the gofferred element on durability and stability of a metal water throughput pipe]. *Vestnik Permskogo Natsional'nogo Issledovatel'skogo Politekhnicheskogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura*, 2012, no. 1, pp. 101-108.

11. Bugaeva O.E. Proektirovanie obdelok transportnykh tonnelej [Designing of lining of transport tunnels]. Leningrad, 1996, 75 p.

12. Beben. D. Numerical analysis of a soil-steel bridge structure. *The Baltic journal of road and bridge engineering*, 2009, no. 4 (1), pp. 13-21.

13. Belyaev V.S., Yakovlev L.S., Ovchinnikov I.G., Osokin I.A.. Analiz jeksperimental'nykh issledovaniy povedeniya metallicheskih gofrirovannykh konstrukcij pod vozdeystviem staticheskikh i dinamicheskikh nagruzok s uchetom ih sovmestnoj raboty s okruzhajushhim gruntom. Chast' 2. Obzor otechestvennykh jeksperimental'nykh issledovaniy. Sopostavlenie rezul'tatov jeksperimenta s rezul'tatami raschetov po raznym metodikam [Analysis of the experimental research of the behavior of metal corrugated structures under static and dynamic loads with account of their collaboration with the surrounding soil. Part 2. Domestic experimental studies. Comparison of experimental results with the results of different methods.]. *Naukovedenie*, 2013, no. 6 (19), available at: <http://naukovedenie.ru/PDF/190TVN613.pdf> (accessed 05 January 2016).

14. Moore I.D., and Taleb, B. Metal Culvert Response to Earth Loading Performance of Three-dimensional Analysis. Transport Research Report no 1656. Transport Research Board, 1999, pp. 37-44.

15. Brachman, R.B., Mak, A.C., Moore, I.D. Ultimate limit state of a deepcorrugated large-span box culvert. *Transportation Research Record*, no. 2201, 2010, pp. 55-61.

Получено 26.09.2017

Об авторах

Гришина Алла Сергеевна (Пермь, Россия) – аспирант кафедры «Строительное производство и геотехника», Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: koallita@yandex.ru).

Бирин Александр Сергеевич (Пермь, Россия) – магистр кафедры «Строительное производство и геотехника», Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: birins@mail.ru).

About the authors

Alla S. Grishina (Perm, Russian Federation) – Postgraduate Student, Department of Construction Operations and Geotechnics, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: koallita@yandex.ru).

Aleksandr S. Birin (Perm, Russian Federation) – Master, Department of Construction Operations and Geotechnics, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: birins@mail.ru).