

УДК 625.745.12

**Егор Александрович Свечников**, аспирант,  
МАДИ, Россия, 125319, Москва, Ленинградский пр., 64, svea2010@inbox.ru

## **КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПО ПОВЫШЕНИЮ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ СООРУЖЕНИЙ ИЗ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ГОФРИРОВАННЫХ КОНСТРУКЦИЙ**

**Аннотация.** Объектом исследования в статье является эффективность различных методов повышения несущей способности сооружений из металлических гофрированных конструкций (МГК). Рассмотрены такие методы, как увеличение толщины металла всей конструкции, установка дополнительных ребер усиления и армирование грунтовой обоймы углепластиковыми стержнями. Оценка эффективности производится на базе расчета сооружения по методу конечных элементов (МКЭ) с учетом экономических показателей рассматриваемых решений.

Приведены результаты расчетов и показатели эффективности каждого технического решения.

**Ключевые слова:** металлическая гофрированная арка, ребра усиления, расчетная модель, метод конечных элементов, грунтовая обойма, армогрунтовая система, комплексный показатель эффективности.

**Egor A. Svechnikov**, post-graduate,  
MADI, 64, Leningradsky Prosp., Moscow, 125319, Russia, svea2010@inbox.ru

## **COMPREHENSIVE EVALUATION OF TECHNICAL SOLUTIONS FOR THE EXTRA LOAD CAPACITY OF CORRUGATED STEEL STRUCTURES**

**Abstract.** The object of study in the article is the efficiency of various methods to increase the load capacity of corrugated steel structures (CSS). Such methods as: increasing

the thickness of the metal for the whole structure, extra reinforcement ribs and backfill ring reinforcement with fibre reinforced rebar considered. The efficiency evaluation based on structural design results using the finite element method (FEM) taking into account the economic indicators for considered methods.

The calculation results and efficiency indicators for each of the technical solutions are given.

**Key words:** corrugated steel arch, reinforcement ribs, computational model, finite element method, backfill ring, reinforced soil system, comprehensive efficiency indicator.

## **Введение**

Металлические гофрированные конструкции (МГК) применяются в транспортном строительстве с конца XIX в. при строительстве искусственных сооружений на автомобильных и железных дорогах наряду с железобетонными конструкциями. Новые технологии изготовления гофрированных элементов и совершенствование методик расчета МГК дает возможность перекрывать пролеты длиной до 30 м [2].

Сооружения из МГК имеют ряд преимуществ, и их внедрение в транспортном строительстве является перспективным. При этом основным недостатком этих сооружений, при увеличении пролетов металлических конструкций, остается низкая эксплуатационная надежность, обусловленная различными факторами.

К этим факторам можно отнести:

– специфику работы сооружений из МГК, определяемую характером взаимодействия металлической оболочки и грунта засыпки;

– обеспечение требуемого очертания и определенных габаритов арочного сооружения при ограниченной высоте насыпи. Если сечение арочного сооружения имеет значительное отклонение от кругового очертания, это приводит к возникновению значительных изгибающих моментов в сечениях МГК.

Приведенные выше факторы, могут быть учтены на стадии проектирования. Их учет, как правило, приводит к необходимости

усиления конструкции. Существует ряд технических решений по усилению конструкции сооружений из МГК, но их применение не всегда является эффективным. Для повышения эффективности применяемых решений необходимо производить их предварительную оценку с учетом экономических показателей.

### **Технические решения по повышению несущей способности сооружений из МГК**

В отечественной и зарубежной практике можно выделить два подхода к повышению несущей способности сооружений из МГК [1, 5]:

1) внесение изменений в проектное решение путем замены одного из компонентов МГК. А именно, замена проектного грунта засыпки на более прочный и жесткий грунт или увеличение толщины металлических листов;

2) введение дополнительных конструктивных элементов, повышающих жесткость конструкции:

а) установка дополнительных ребер усиления, в том числе с заполнением гофр бетоном;

б) бетонирование железобетонных поясов или ребер жесткости;

в) применение армогрунтовых систем при устройстве грунтовой обоймы сооружения из МГК.

В статье рассмотрены три варианта технического решения: увеличение толщины металлических листов, установка ребер усиления и применение армогрунтовой системы.

### **Рассматриваемое сооружение**

Рассматриваемое сооружение запроектировано в качестве путепровода на автомобильной дороге. Поперечное сечение сооружения приведено на рис. 1.

Путепровод представляет собой арку с пролетом 14,68 м, высотой 6,59 м из металлических гофрированных листов, толщиной 7 мм, с

гофрами 381x142 мм, длина сооружения  $L = 20$  м. Материал металлоконструкций – сталь 09Г2Д по ГОСТ 19281-89. Грунтовая призма обратной засыпки сооружения устраивается из ПГС по ГОСТ 23735-79.

Для упрощения расчетной схемы, основание и фундамент считаются жесткими. Закрепление пят арки – шарнирное.

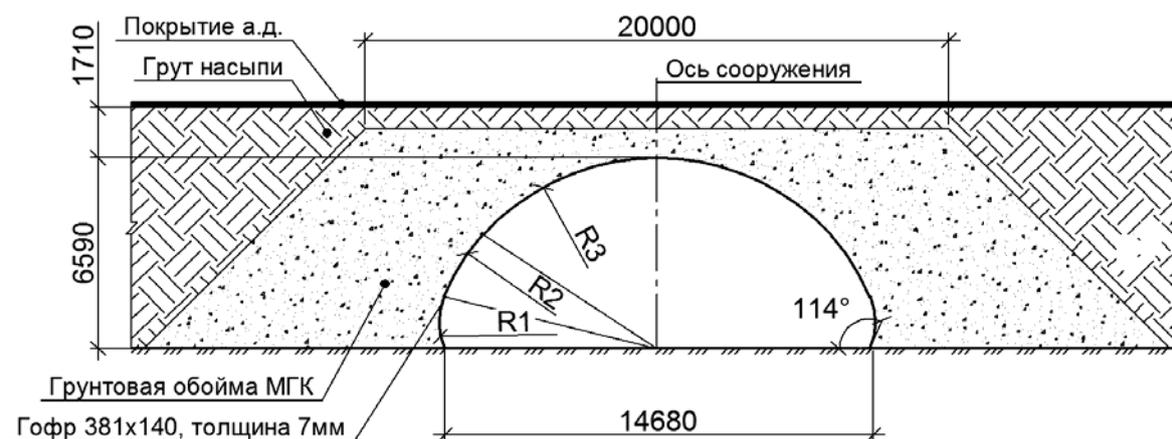


Рис. 1. Поперечное сечение сооружения

Для данной конструкции путепровода, произведен расчет по МКЭ в программе Plaxis 2D на действие статических постоянной и временной нагрузки. В качестве временной нагрузки выбрана нагрузка Н14 по ГОСТ Р 52748-2007. Был смоделирован проезд нагрузки по сооружению с учетом ее установки в призме обрушения. В результате расчета было получено напряженно-деформированное состояние (НДС) сооружения. Характерные эпюры продольной силы и изгибающих моментов приведены на рис. 2, буквой «А» обозначена зона возникновения наибольших изгибающих моментов в МГК.

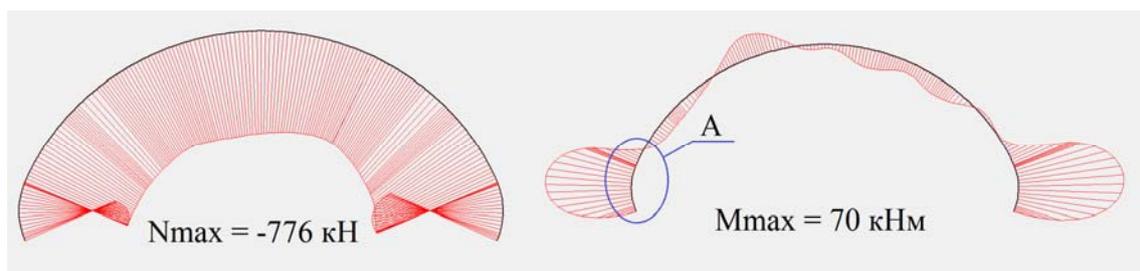


Рис. 2. Эпюры внутренних усилий в МГК

По результатам предварительных расчетов были определены максимальные нормальные напряжения в сечениях МГК,  $\sigma_{\max} = 310,18$  МПа, что превышает предел текучести стали 09Г2Д.

В связи с чем были рассмотрены технические решения по усилению конструкции.

### **Технические решения по усилению конструкции**

Вариант № 1. Увеличение толщины металла всех конструкции до 8 мм. Увеличение толщины металла является наиболее простым способом усиления, поскольку не требует дополнительных трудозатрат и не меняет расчетную схему сооружения. Такое усиление приводит к увеличенному расходу металла. Кроме того, возможности такого усиления ограничены толщиной выпускаемых листов. На данный момент, для большинства производителей гофры 381x142 мм это 8 мм. При строительстве сооружений с пролетами более 15 м, для удовлетворения условий прочности, может потребоваться толщина листов более 8 мм или применение более прочных сталей.

Вариант № 2. Установка ребер усиления, толщиной 7 мм через один лист в продольном направлении, в зоне возникновения наибольших изгибающих моментов. Поперечное сечение по варианту № 2 приведено на рис. 3.

Установка дополнительных ребер усиления является менее технологичным решением, так как увеличиваются объемы работ по монтажу металлоконструкций и заполнению пустот между волнами гофр, так же усложняется транспортировка конструкций из-за увеличения количества листов. Такое решение меняет расчетную схему конструкции.

Достоинством этого решения является возможность более рационально распределить материал, установив ребра только в наиболее нагруженных сегментах сечения.

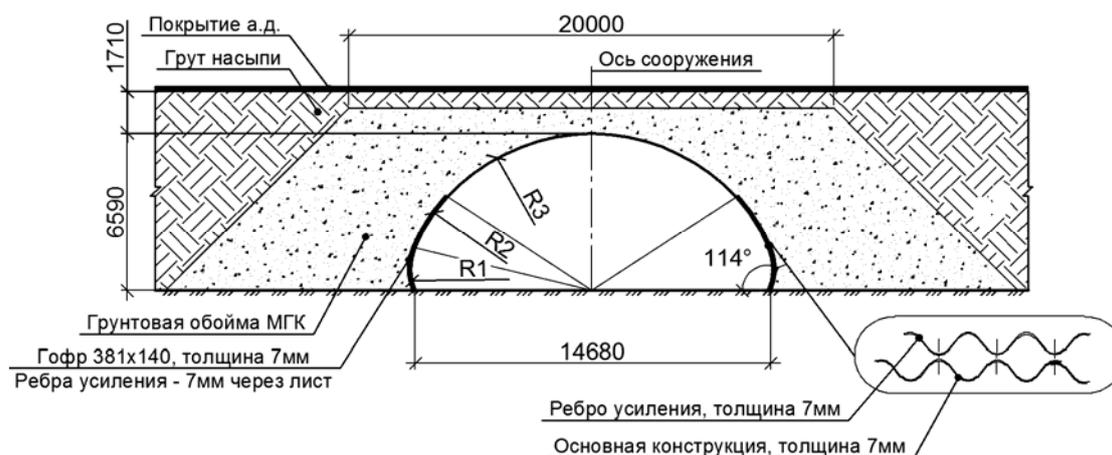


Рис. 3. Поперечное сечение сооружения. Вариант № 2

Вариант № 3. Армирование грунтовой обоймы стержнями углепластиковой арматуры FibARM Rebar 16S по ТУ 2256-005-61664530-2011. Длина стержней – 4,5 м, шаг стержней по высоте – 0,5 м, продольный шаг – 0,8 м. Стержни располагаются на расстоянии 100 мм от металлической оболочки во впадинах гофра. Поперечное сечение по варианту № 3 приведено на рис. 4.

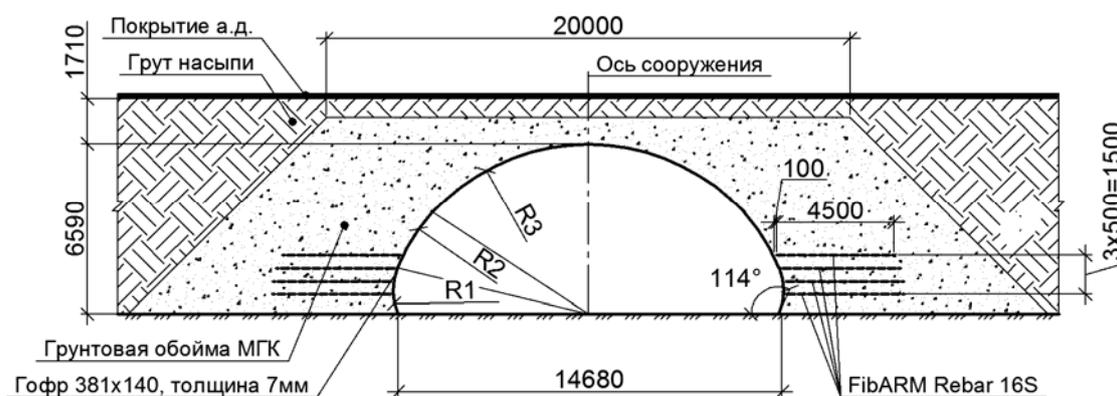


Рис. 4. Поперечное сечение сооружения. Вариант № 3

Армирование грунтовой обоймы стержнями углепластиковой арматуры также позволяет усилить отдельные области грунтового массива. Такое усиление не требует сложных технологических операций, стержни просто укладываются в грунт на стадии отсыпки грунтовой обоймы. Углепластиковые стержни обладают высокой коррозионной устойчивостью, не требуют дополнительной защиты.

Основным недостатком такого решения является высокая стоимость углепластиковых стержней.

Каждый из рассмотренных вариантов усиления имеет свои преимущества и недостатки. Для сравнения приведенных технических решений была проведена серия расчетов по МКЭ, и проанализировано НДС сооружения по вариантам. Изменение НДС оценивалось по величине максимальных нормальных напряжений в МГК. Результаты расчетов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты расчетов

Техническое решение	Максимальные нормальные напряжения $\sigma_{\max}$ , МПа	Снижение максимальных напряжений, %
Вариант № 1. Увеличение толщины металла до 8 мм	291	6,3
Вариант № 2. Установка ребер усиления толщиной 7 мм через лист	288	7,1
Вариант № 3. Армирование грунта углепластиковыми стержнями	275	11,3

По каждому из вариантов, нормальные напряжения в сечениях МГК по отношению к базовому техническому решению снизились и не превышают предела текучести стали, таким образом, каждое из предлагаемых решений является эффективным, с точки зрения повышения несущей способности сооружений из МГК.

**Сравнение эффективности рассматриваемых решений**

Результаты проведенных расчетов отражают снижение максимальных нормальных напряжений в МГК по каждому из вариантов, однако, в силу существенных различий в предложенных решениях, оценка их эффективности требует комплексного подхода.

Комплексный подход предполагает возможность учета ряда факторов, влияющих на эффективность предлагаемого технического решения.

В качестве таких факторов можно выделить:

- изменение НДС сооружения;
- увеличение стоимости строительства из-за использования дополнительных материалов;
- увеличение трудоемкости из-за дополнительного объема строительно-монтажных работ при устройстве усиления.

Таким образом, для оценки эффективности предлагаемых решений, предлагается использовать комплексный показатель эффективности –  $e$ . Этот показатель определяется по формуле 1.

$$e = \frac{\Delta\sigma_{\max}}{Xn}, \quad (1)$$

где  $e$  – комплексный показатель эффективности, %;  $\Delta\sigma_{\max}$  – снижение максимальных нормальных напряжений в МГК, %;  $X$  – коэффициент увеличения стоимости сооружения, определяемый по формуле 2;  $n$  – коэффициент, учитывающий увеличение объема строительно-монтажных работ и их стоимость:

$$X = \frac{K + k}{K}, \quad (2)$$

где  $K$  – стоимость металлоконструкций базового технического решения (см. рис. 1), тыс. руб;  $k$  – стоимость дополнительных материалов для усиления конструкции.

Определение коэффициента увеличения стоимости сооружения  $X$  производится в соответствии со средней стоимостью конструкций и материалов отечественных производителей.

Средняя цена за тонну металлических гофрированных конструкций с гофром 381x142, принята равной 140 тыс. руб/т.

Средняя цена углепластиковых стержней FibARM Rebar 16S за метр, принята равной 0,9 тыс. руб/м.

Расход металла по базовому техническому решению составляет 31,8 т, при длине сооружения  $L = 20$  м, таким образом, стоимость металлоконструкций базового технического решения составляет  $K = 4452$  тыс. руб.

Таблица 2

Определение коэффициента  $X$

Техническое решение	Вес доп. м/к, т	Расход углепласт. стержней, м	Стоимость доп. материалов $k$ , тыс. руб	Коэфф. $X$
Вариант № 1. Увеличение толщины металла до 8 мм	4,6	–	644	1,14
Вариант № 2. Установка ребер усиления толщиной 7 мм через лист	6,2	–	868	1,20
Вариант № 3. Армирование грунта углепластиковыми стержнями	–	900	810	1,18

Подставляя результаты, приведенные в табл. 2 в формулу 1 определим комплексный показатель эффективности для каждого технического решения.

Коэффициент, учитывающий увеличение объема строительно-монтажных работ и их стоимость  $n$ , в первом приближении, назначим в зависимости от сложности технического решения.

Таблица 3

Определение показателя  $e$

Техническое решение	$\Delta\sigma_{\max}$ , %	$X$	$n$	$e$ , %
Вариант № 1. Увеличение толщины металла до 8 мм	6,3	1,14	1	5,53
Вариант № 2. Установка ребер усиления толщиной 7 мм через лист	7,1	1,20	1,1	5,38
Вариант № 3. Армирование грунта углепластиковыми стержнями	11,3	1,18	1,3	7,37

Представим данные табл. 3 в виде диаграмм, рис. 5.

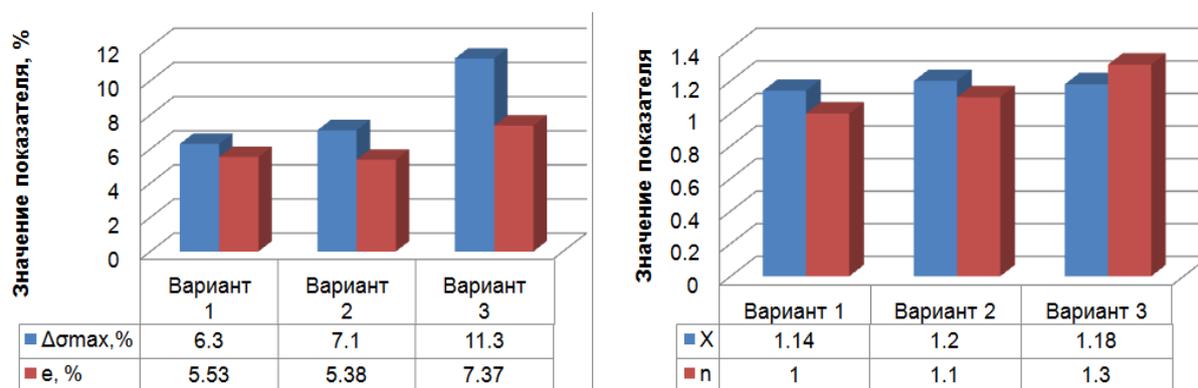


Рис. 5. Показатели эффективности рассматриваемых решений

## Выводы

В статье приведено сравнение таких технических решений по повышению несущей способности путепровода из МГК, как:

- увеличение толщины металла всех конструкции до 8 мм – вариант № 1;
- установка ребер усиления, толщиной 7 мм через один лист в продольном направлении, в зоне возникновения наибольших изгибающих моментов – вариант № 2;
- армирование грунтовой обоймы стержнями углепластиковой арматуры – вариант № 3.

Предложен подход к оценке эффективности решений с учетом их конструктивных и экономических показателей.

На основании результатов, проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

1. Для данной конструкции путепровода каждое из предлагаемых решений является эффективным, с точки зрения повышения несущей способности сооружения из МГК, и позволяет применить сталь 09Г2Д.
2. Получено снижение максимальных нормальных напряжений в сечениях МГК по вариантам № 1, № 2 и № 3 на 6,3; 7,1 и 11,3%

соответственно. Таким образом, армирование грунтовой обоймы МГК углепластиковыми стержнями (вариант № 3) наиболее эффективно. Стоит отметить, что эффективность армогрунтовой системы зависит от формы поперечного сечения МГК, в данной статье рассмотрена полирадиусная арка, для полукруглой или двухрадиусной арки может быть получено иное распределение нормальных напряжений.

3. Решение по варианту № 2 требует наибольших затрат на дополнительные материалы для усиления.

4. По результатам комплексной оценки, с учетом экономических показателей, вариант № 3 является наиболее эффективным для данного сооружения.

### **Список литературы**

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)».

Введ. 2009-06-21. М.: Изд-во стандартов, 2009.

2. Осокин И.А. Совершенствование методов расчета металлических гофрированных конструкций с эксплуатационными повреждениями: дис. ... канд. техн. наук. Пенза.: УрГУПС, 2014. 242 с.

3. Переселенков Г.С., Орлов Г.Г., Кириллов Г.А. Путепроводы из металлических гофрированных структур // Транспортное строительство. 2009. № 4. С. 10–13.

4. Соколов А.Д. Армогрунтовые системы автодорожных мостов и транспортных развязок. СПб.: ООО Отраслевая медиакорпорация «Держава», 2013. 504 с.

5. Handbook of Steel Drainage & Highway Construction Products / Published by Corrugated steel pipe Institute, 2007. 470 p.

## References

1. Rekomendacii po proektirovaniyu i stroitel'stvu vodopropusknyh sooruzhenij iz metallicheskih gofirovannyh struktur na avtomobil'nyh dorogah obshhego pol'zovanija s uchetom regional'nyh uslovij (dorozhno-klimaticheskikh zon), ODM 218.2.001-2009, Moscow, Izd-vo standartov, 2009.

2. Osokin I.A. *Sovershenstvovanie metodov rascheta metallicheskih gofirovannyh konstrukcij s jekspluacionnymi povrezhdenijami* (Improvement of calculation methods for corrugated steel structures with operational damage), Doctor thesis, Penza, UrGUPS, 2014, 242 p.

3. Pereselenkov G.S., Orlov G.A., Kirillov G.A. *Transportnoe stroitel'stvo*, 2009, no. 4, pp. 10–13.

4. Sokolov A.D. *Armogruntovyje sistemy avtodorozhnyh mostov i transportnyh razvjazok* (Reinforced soil systems of a highway bridges and flyovers), St.-Petersburg, OOO Otraselevaja mediakorporacija «Derzhava», 2013, 504 p.

5. Handbook of Steel Drainage & Highway Construction Products/  
Published by Corrugated steel pipe Institute, 2007, 470 p.