

## Экспериментальные исследования

### РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО - ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОГО СВОДА ГРУНТОЗАСЫПНОГО АВТОДОРОЖНОГО МОСТА

В.С. САФРОНОВ, *д-р техн. наук, проф.*,

В.В. ЗАВОНОВ, *инж.*

*ГОУ ВПО Воронежский государственный архитектурно-строительный университет*

*Россия, г. Воронеж, 394006, ул. 20-летия Октября, 84, ГОУВПО ВГАСУ,*

*тел. 8(910)409-65-73, e-mail: [vladimirzazvonov@yandex.ru](mailto:vladimirzazvonov@yandex.ru)*

*Описываются методика и результаты исследования напряженно-деформированного состояния (НДС) грунтозасыпного мостового сооружения с цилиндрическим сводом постоянной толщины из монолитного железобетона с использованием плоских и пространственных конечно-элементных моделей. Данные натурных измерений перемещений и деформаций пролетного строения сопоставляются с результатами расчета на основе принятых моделей.*

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** грунтозасыпной мост, железобетонный свод, песчаная засыпка, напряженно-деформированное состояние, статическое испытание, нагрузка, деформации, физическая нелинейность, напряжения, прогибы.

Мостовые сооружения являются наиболее ответственными и сложными элементами автомобильных дорог [1]. Чаще всего их техническое состояние определяет пропускную способность участка дороги. В настоящее время на федеральных и региональных автодорогах России эксплуатируется множество малых и средних мостов, которые нуждаются в капитальном ремонте и реконструкции. Одним из эффективных способов восстановления морально устаревших транспортных сооружений является замена традиционных балочных мостов на грунтозасыпные мостовые сооружения (ГМС) со сводчатым пролетным строением из железобетона [2]. Они отличаются простотой возведения и экономичностью. Широкое применение ГМС сдерживается недостаточным объемом исследований НДС несущих элементов на действие постоянных и временных нагрузок. Некоторое представление о влиянии деформационных характеристик песчаной засыпки на НДС грунтозасыпных мостов можно получить из исследования, представленного в статье [3].

В настоящей статье описываются результаты расчетного анализа в нелинейной постановке НДС эксплуатируемого с 2005 года в Вологодской области на 156 км а/д А-114 «Вологда - Новая Ладога» грунтозасыпного моста со сводчатым пролетным строением из монолитного железобетона. Результаты расчетов с использованием плоских и пространственных моделей методом конечных элементов (МКЭ) сопоставляются с данными натурных статических испытаний сооружения.

Основные параметры сооружения, построенного по проекту ГП «РОС-ДОРНИИ» для пропуска временных нагрузок А11 и НК-80, являются следующими (рис. 1): габарит проезда по граням барьерного ограждения – 12,15 м; свод цилиндрического очертания шириной 16 м радиусом  $R = 6,0$  м постоянной толщины 0,3 м; бетон класса В30, арматура в виде верхней и нижней сеток  $D = 16$  мм с квадратной ячейкой 0,15 м; максимальная высота насыпи, считая от подошвы ригеля – 9,0 м; минимальная толщина песчаной засыпки над поверхностью свода с учетом конструкции дорожной одежды составляет: по оси дороги – 0,67 м, у барьерного ограждения – 0,5 м.



Рис. 1. Общий вид моста при статических испытаниях

Для проведения численных исследований в программном комплексе Лира, имеющем обширную библиотеку конечных элементов, реализованы плоская и пространственная конечно-элементные расчетные схемы в нелинейной постановке. Железобетонный свод в пространственной расчетной схеме моделировался прямоугольными оболочечными КЭ, в плоской - стержневыми КЭ. По длине окружности и по ширине свода принималось 18 элементов. Грунтовый массив в пространственной расчетной схеме представлен объемными КЭ в виде параллелепипедов и тетраэдров, в плоской модели – пластинчатыми КЭ треугольной и прямоугольной формы с разрешающими соотношениями плоской деформации. Нелинейные свойства грунтового массива, окружающего сводчатую несущую конструкцию, в расчетах принята в соответствии с моделью Мора – Кулона, которая использует следующие количественные параметры: модуль деформации  $E$ , коэффициента Пуассона  $\nu$ , сцепление  $c$ , угол внутреннего трения  $\varphi$ .

В качестве иллюстрации на рис. 2 и 3 представлены полученные с помощью принятых расчетных схем деформируемое состояние конструкции и изополя приведенных напряжений в грунтовом массиве.

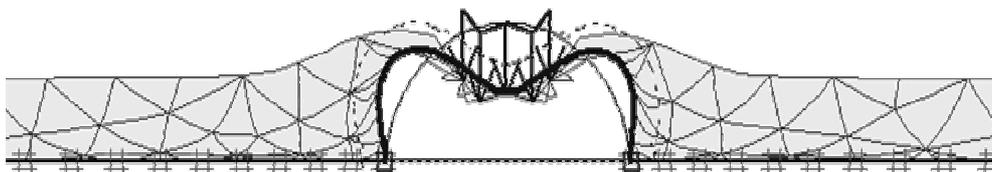


Рис. 2. Плоская КЭ расчетная схема ГМС. Деформируемое состояние конструкции от временной нагрузки

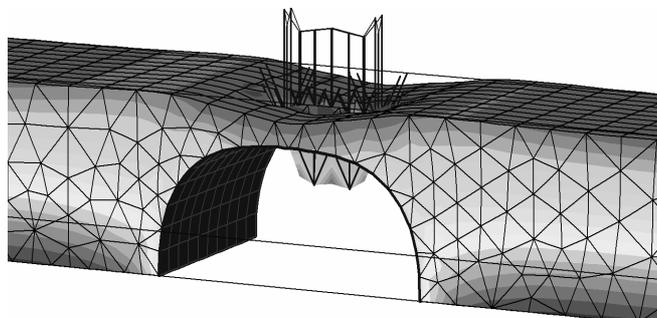


Рис. 3. Пространственная КЭ расчетная схема ГМС. Деформируемое состояние конструкции от временной нагрузки. Изополя приведенных напряжений в грунтовом массиве

Выполненные численные исследования привели к выводу, что применение плоской расчетной схемы дает весьма приближенные результаты о величинах усилий и деформаций в своде. Они существенно зависят от принятой гипотезы о включении свода по ширине в совместную работу при локальных нагрузках. Пространственная модель на основе МКЭ позволяет корректно произвести оценку НДС оболочки и адекватно описать распределение напряжений в своде по его ширине.

Для оценки адекватности принятой пространственной расчетной модели поведению под нагрузкой грунтозасыпного моста проведены его натурные статические испытания. В качестве испытательной нагрузки использовался трехосный автомобиль Volvo FM 400 6x4 общей массой 41 т (рис. 2) с нагрузкой на заднюю тележку 312 кН и переднюю ось 90кН. Автомобиль при испытаниях моста устанавливался по трем схемам загрузки таким образом, чтобы вызвать наибольшие усилия в трех характерных сечениях, расположенных на расстоянии  $\frac{1}{4}$ ,  $\frac{1}{2}$  и  $\frac{3}{4}$  пролета от опор. В поперечном направлении испытательная нагрузка устанавливалась в пределах полосы безопасности на расстоянии 3,25 м от края конструкции и вдоль продольной оси автомобильной дороги на расстоянии 8,0 м от края конструкции. В продольном направлении средняя ось автомобиля последовательно устанавливалась над указанными выше сечениями. В процессе испытаний измерялись вертикальные и горизонтальные перемещения, а также продольные и поперечные деформации нижних волокон в характерных сечениях свода. Перемещения измерялись прогибомерами системы Максимова с точностью 0,1 мм, а продольные и поперечные деформации свода – деформометрами на базе 35 см с использованием индикаторов МИГ-1 с точностью 1мкм. Схема установки измерительных приборов приведена на рис. 4.

При сопоставлении измеренных при испытаниях перемещений и деформаций использовались величины давлений колес автомобиля, координаты точек сил приложения нагрузок, геометрические размеры грунтозасыпной конструкции, включающие толщину и ширину свода, высоту засыпки.

В расчетах для описания НДС свода был принят экспоненциальный закон нелинейного деформирования со следующими характеристиками:

- для бетона модуль упругости  $E = 32500\text{МПа}$ , предельное напряжение на сжатие  $\sigma(-) = -22,0\text{МПа}$ , предельное напряжение на растяжение  $\sigma(+)=1,80\text{МПа}$ ,
- для арматуры - модуль упругости  $E = 1.96 \times 10^5\text{МПа}$ , предельное напряжение  $\sigma(-) = -340\text{МПа}$ ,  $\sigma(+)= 340\text{МПа}$ .

Расположение и площадь арматуры учтены в каждом элементе оболочки в виде арматурных включений из двух слоев (верхней и нижней сеток).

Экспериментальные прогибы сопоставлены с расчетными значениями в характерных сечениях оболочки на рис. 5 и 6. На графиках пунктирными линиями показаны измеренные при натуральных испытаниях прогибы  $Z_э$ , точечными линиями – расчетные прогибы с использованием линейной расчетной схемы  $Z_p$ , сплошными линиями расчетные прогибы, вычисленные по физически нелинейной расчетной схеме  $Z_{pф}$ .

На рис. 5 представлены графики изменения прогибов свода в местах расположения прогибомеров при 1-ой схеме расположения нагрузки вплотную к барьерному ограждению. Графики изменения прогибов свода в местах расположения прогибомеров по 2-ой схеме расположения нагрузки по оси проезжей части моста представлены на рис. 6. Из графиков видно, что расчетные прогибы оболочки во всех загрузках превышают опытные от 1 до 50%.

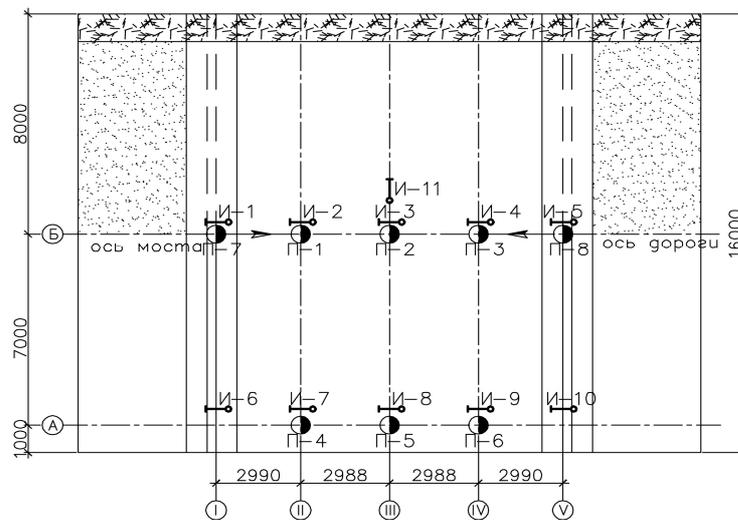
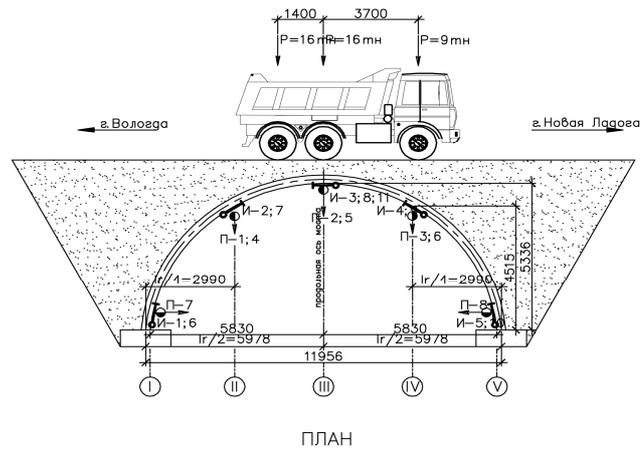


Рис. 4. Схема установки измерительных приборов при статических испытаниях

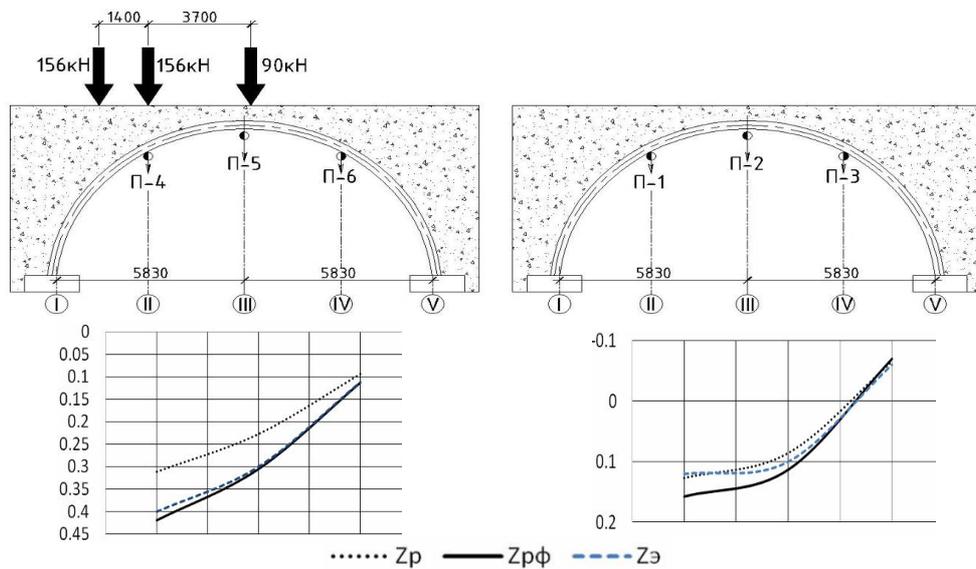


Рис. 5. Графики прогибов в мм свода при загрузке сечения II по оси «А»

Картина напряженного состояния в точках нижней поверхности оболочки деформируемой конечно-элементной модели с траекториями главных напряжений, полученная из расчета на испытательную нагрузку, расположенную над

сечением III, представлена на рис.7. Напряжения, возникающие в нижнем слое оболочки по деформированной схеме близки к опытным, отклонение результатов расчета составляет от 5 до 30%, тогда как при линейном расчете свода погрешность возрастает до 50%.

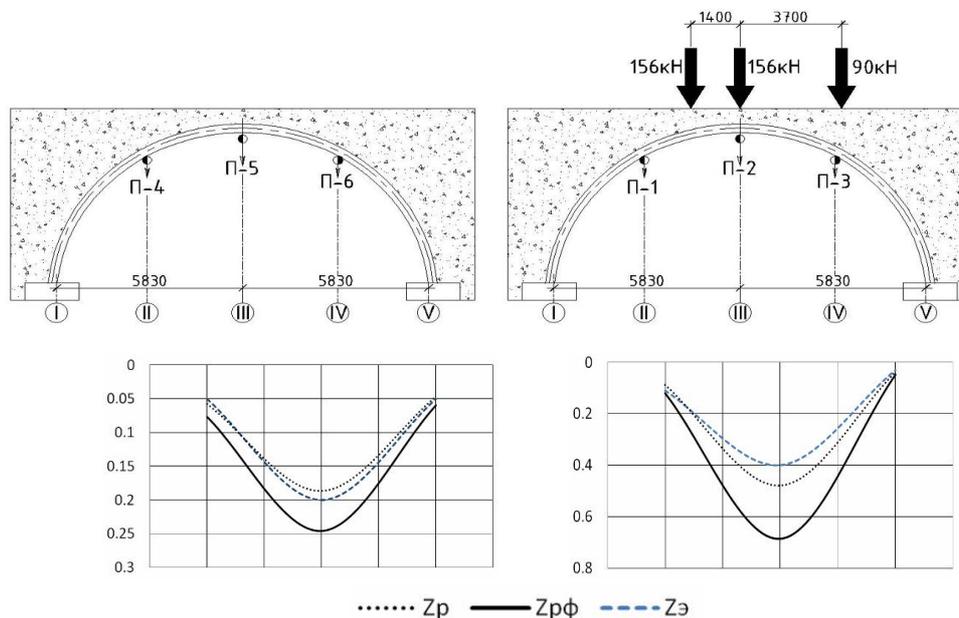


Рис. 6. Изменение прогибов поперечного сечения в мм, при загрузении сечения III по оси «Б»

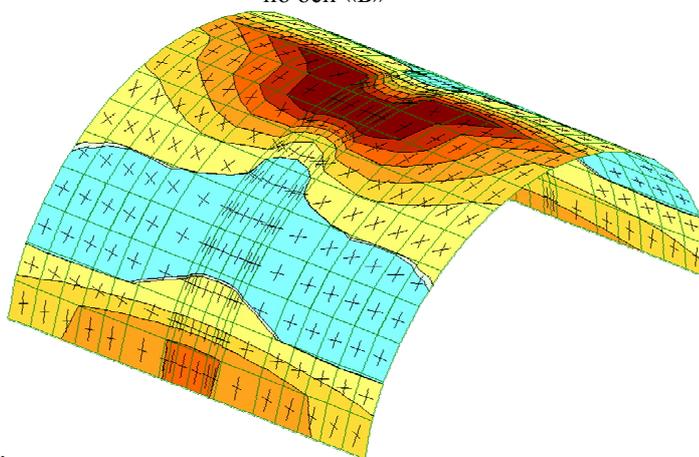


Рис. 7. Распределение главных напряжений по нижней поверхности оболочки

Распределение фибровых напряжений по ширине свода свидетельствует о том, что наиболее напряженным является замковое сечение в зоне приложения временной нагрузки. Возникновение наибольших растягивающих напряжений по длине свода в нижних волокнах замкового сечения оболочки связано с наличием безотпорной зоны.

По первой схеме загрузки при установке нагрузки вблизи к барьерному ограждению максимальные растягивающие расчетные напряжения, равные 0,95 МПа, несколько больше экспериментальных напряжений, составляющих 0,87 МПа. Во второй схеме загрузки при расположении автомобиля по оси дороги расчетные напряжения, равные 0,247 МПа, оказались близки опытным значениям 0,226 МПа. Отклонения результатов расчета от опытных данных со-

ставляет от 5 до 30%, при этом верхняя граница отклонений ( $\approx 47\%$ ) в большую сторону расчетных значений, наблюдается лишь в единичных случаях.

Отклонения полученных расчетных результатов от опытных можно объяснить тем, что произошел процесс неравномерного уплотнения грунта в зоне замка арки вблизи места приложения нагрузки, где грунт имеет минимальную толщину. Он уплотнился в большей степени по сравнению с грунтом, расположенным по бокам арки от действия временной нагрузки.

Необходимо отметить, что с течением времени (0,5...3 года в зависимости от степени уплотнения при возведении насыпи) происходит самоуплотнение грунтов под собственным весом и движением транспорта. Модуль деформации грунта при этом увеличивается, что приводит к заметному увеличению коэффициента компрессионного сжатия.

Для анализа влияния изменения модуля деформации на НДС свода вблизи сечения III по второй схеме загрузки выполнялось моделирование неоднородности уплотнения грунта толщиной 0,5 м над замковой частью свода путем увеличения модуля деформации с 22,6 до 50 МПа. При этом прогиб в характерной точке конструкции уменьшился до значения 0,456 мм, что сократило погрешность до 14%, и привело к увеличению сжимающего напряжения на 4% до значения 0,779 МПа и увеличению растягивающего напряжения на 6% до значения 0,289 МПа. Таким образом, изменение модуля деформации грунта над замком повлияло на НДС свода. При этом расчетные параметры практически совпали с опытными значениями.

### **Выводы**

При расчете и проектировании грунтозасыпных мостов с крутыми и полными сводами, сопротивляющихся действующим нагрузкам совместно с грунтом, необходимо учитывать, что с течением времени происходит самоуплотнение грунтов под влиянием собственного веса засыпки и от проезда автомобилей. Упомянутое уплотнение грунта приводит к изменению модуля деформации песчаной засыпки, поэтому следует на стадии проектирования производить расчеты как для параметров свежееуложенного грунта, так и для характеристик консолидированного грунта.

Характер уплотнения грунта в пазухах между элементами конструкций более сложный и как показывает опыт эксплуатации таких сооружений, происходит неодинаковое уплотнение грунта над замком и грунта, расположенного над опорами. Таким образом, сравнительный анализ опытных и расчетных данных показывает удовлетворительную сходимость результатов с учетом принятых гипотез и допущений при расчетах, и позволяет считать, что приведенные пространственные расчетные схемы адекватно описывают поведение оболочки по деформируемой схеме в грунтовой массе.

Анализ результатов исследования распределения напряжений и деформаций по ширине свода позволяет отметить, что при разном расположении одного и того же транспортного средства величина напряжений в конструкции свода существенно меняется. При удалении нагрузки от края свода происходит перераспределение напряжений по ширине, что позволяет увеличить предельную массу транспортного средства при пропуске автотранспорта большой грузоподъемности.

Как показывают результаты испытания статической нагрузкой, грунтозасыпной мост на 156 км автомобильной дороги А-114 Вологда - Новая Ладога имеет достаточную для безопасной эксплуатации прочность и жесткость.

Рекомендуется для решения практических задач расчета при проектировании грунтозасыпных сооружений учитывать физическую нелинейность мате-

риала железобетонного свода, совместное взаимодействие конструкции моста и грунтового массива засыпки, что позволяет получить достоверные результаты на стадии проектирования.

#### Л и т е р а т у р а

1. СНиП 2.05.03-84\*. Мосты и трубы/ Минстрой России.- М.: ГП ЦПП, 1996. –214с.
2. *Большой А.А., Зазвонов В.В.* Способ капитального ремонта моста и арочный грунто-засыпной мост / Патент на изобретение № 013832. 30.08.2010. Бюл. № 4.
3. *Сафронов В.С., Зазвонов В.В.* Влияние деформационных характеристик песчаной засыпки на напряженно-деформированное состояние грунтозасыпных мостов / Строительная механика и конструкции, 2010, №1. С 16-20.

#### **EXPERIMENTAL-AND-THEORETICAL STUDY OF THE STRESS-STRAIN STATE OF THE FERROCONCRETE ARCH UNDER HIGHWAY BRIDGE**

V.S. Safronov, V.V. Zazvonov

Described are procedures and results of investigating the stress- strained state (SSS) of the filled in with soil bridge construction with a cylindrical arch of a constant thickness made from the monolithic reinforced concrete with the use of flat and three-dimensional finite-element models. The data of the full-scale measurements of displacements and deformations of the bridge span are compared with the results of calculation on the basis of the models accepted.

**KEYWORDS:** filled in with soil bridge, ferroconcrete arch, sand filling, the stressed-strained state, static test, a load, deformation, physical nonlinearity, stress, deflection.

