



17-osios jaunųjų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos ateitis“ teminės konferencijos  
**TRANSPORTO INŽINERIJA IR VADYBA**,  
vykusios 2014 m. gegužės 8 d. Vilniuje, straipsnių rinkinys

Proceedings of the 17th Conference for Junior Researchers 'Science – Future of Lithuania'  
**TRANSPORT ENGINEERING AND MANAGEMENT**, 8 May 2014, Vilnius, Lithuania

Сборник статей 17-й конференции молодых ученых «Наука – будущее Литвы»  
**ИНЖЕНЕРИЯ ТРАНСПОРТА И ОРГАНИЗАЦИЯ ПЕРЕВОЗОК**, 8 мая 2014 г., Вильнюс, Литва

## КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ПЛИТНО-РЕБРИСТЫХ АВТОМОБИЛЬНЫХ МОСТОВЫХ СИСТЕМ

Владимир Волоцюга<sup>1</sup>, Валентин Шиндер<sup>2</sup>

*Кафедра мостов и строительной механики, Национальный университет «Львовская политехника», Львов, Украина  
Эл. почта: <sup>1</sup>volotsuha@gmail.com; <sup>2</sup>valentine.shynder@gmail.com*

**Аннотация.** В данной статье рассмотрено моделирование напряженно-деформированного состояния железобетонных мостовых конструкций на примере автодорожного моста по типовому проекту. Моделирование проводилось в расчетном комплексе Femap with NX Nastran методом конечных элементов. К плитно-ребристому прогону моста приложена нагрузка 1,2 НК-80. Проведено упругий статический расчет конструкции.

**Ключевые слова:** метод конечных элементов, моделирование, железобетон, автомобильный мост; Femap, NX Nastran, напряженно-деформированное состояние.

### Введение

Плитно-ребристые системы получили широкое применение в железобетонных конструкциях пролетных строений автодорожных мостов, начав применяться в мостостроении в конце сороковых годов прошлого века. Форма сечения таких конструкций отвечает принципам эффективного использования материала: сжатая зона балок развита за счет объединения ребер с плитой проезжей части, рабочая растянутая арматура располагается в нижней части ребер балок. Возможности учета пространственной работы таких конструкций раньше ограничивались сложностью вычислительного характера. Сегодня же, теория сооружений имеет широкий арсенал средств для расчета пространственных систем. Среди них классическая теория стержневых систем, которая особо эффективна в канонической форме. Широко применяется теория тонкостенных стержней с жестким контуром поперечного сечения. Также используется теория плитно-балочных конструкций, метод конечных элементов (МКЭ) и другие. МКЭ стал широко применяться благодаря своей универсальности и стремительно возросшим возможностям вычислительных машин, компьютеров. Этот численный метод основан на условном разделении упругого тела (конструкции) на ряд элементов, для которых решения имеют простую форму, а в некоторых случаях – эле-

ментарную. Элементы объединяют в узлах, для которых удовлетворяются условия неразрывности перемещений и условия равновесия.

Рассматривают пять основных этапов решения задач с МКЭ: разделения системы на конечные элементы (КЭ) и выбор координатных функций; построения матриц жесткости и приведения местной нагрузки к узловой для каждого КЭ; определения степеней свободы; определения компонентов напряженно-деформированного состояния (перемещений, напряжений) по области элемента либо всей системы. Наиболее важным моментом есть получение матрицы жесткости элемента, которая необходима для составления систем канонических уравнений метода перемещений для рассматриваемой конструкции. Матрицы жесткости содержат информацию о физико-механических свойствах материалов и геометрические параметры сечений (толщину, ширину, длину). Матрицы жесткости, узловые усилия и перемещения переводят с местной системы координат в общую, относительно которой составляют матрицу жесткости.

На сегодняшний день, расчет и исследования железобетонных конструкций МКЭ используя современные вычислительные программные комплексы (ПК) является актуальным вопросом, так как МКЭ дает возможность описать чрезвычайно большой спектр задач, а возможности и мощности вычисли-

тельных машин растут по месяцам. Такое сочетание инструментов расчета также дает возможность при моделировании и расчете учесть все большее количество реальных свойств и нюансов, которые раньше опускались в допустимую погрешность из-за сложности ее учета. В этом случае, одним из ключевых, сложных и трудоемких процессов является процесс моделирования – создания расчетной модели. Это творческий процесс, от качества которого зависит точность полученного результата, время проведения расчета и его верность (сходимость). Важной особенностью в данном случае есть моделирование именно железобетона, как сложного композитного материала.

## 1. Выбор программного обеспечения

Пакеты программ, которые реализовывают метод конечных элементов (МКЭ) играют самую важную роль среди многочисленных CAD/CAM/CAE программ. К наиболее известным и распространенным таким программным комплексам относят Ansys, Nastran, Marc, Fem Models, Impact, ScadSoft, CosmosWorks, Scad, Samcef, Zebulon, Lira, Диана, Рипак, Abaqus, Comsol Multiphysics, Robot и другие. Каждый из них имеет свои особенности, преимущества и недостатки.

Среди всего диапазона расчетных ПК был избран Femap с встроенным решателем NX Nastran (NASA STRuctural ANalysis), что является современным решением от компании Siemens PLM Software. Выбор именно этого ПК обусловлен несколькими факторами:

- Femap with NX Nastran зарекомендовал себя как надежный продукт для решения сложных нелинейных задач (что важно в перспективе для учета разного рода нелинейных свойств железобетона);

- Используется разными инженерно-техническими организациями для решения большого числа разноплановых инженерных и научных проблем, в ряде случаев – как эталон решения;

- Возможность его использования не только на суперкомпьютерах, но и на персональных в среде Windows;

- Высокая степень интеграции с большим числом приложений и другими вычислительными системами;

- Доступ сотрудников университета к лицензионным версиям данного продукта.

Кроме того, несмотря на широкие возможности указанного комплекса и его универсальность, на данный момент только начинается его применения к автомобильному и мостовому строительству, а также к моделированию и расчету железобетонных конструкций как таковых.

Моделирование и расчет железобетонных конструкций в среде Femap NX Nastran проведено в работах (Чередников *и др.* 2013), (Шалобыта *и др.* 2013) и некоторых других. В работах (Дмитренко 2013), (Гасенко *и др.* 2010) и других – учитывается совместная работа стали и бетона.

Femap with NX Nastran также используют с целью в достаточной точности произвести моделирова-

ния и расчет различной степени сложных конструкций, не прибегая к дорогостоящему эксперименту (Шалобыта *и др.* 2013) и др.

## 2. Объект исследования

В качестве объекта исследования выбрано типовое пролетное строение без диафрагм длиной 15 м из железобетонных балок таврового сечения с ненапрягаемой арматурой для автомобильных мостов по серии 3.503.1-73 Союздорпроекта. Поперечное сечение состоит из шести балок с расчетным пролетом 14,4 м. Габарит по типовой схеме 4 под нагрузку А-11 и НК-80: Г-8,0+2×0,75. Бетон балок принят в соответствии с классом В25, арматура класса А-III.

На рис. 1 показано расчетное поперечное сечение типовой балки. На рис. 2 наведена схема моделируемого поперечного сечения типового пролетного строения по серии 3.503-1-73.

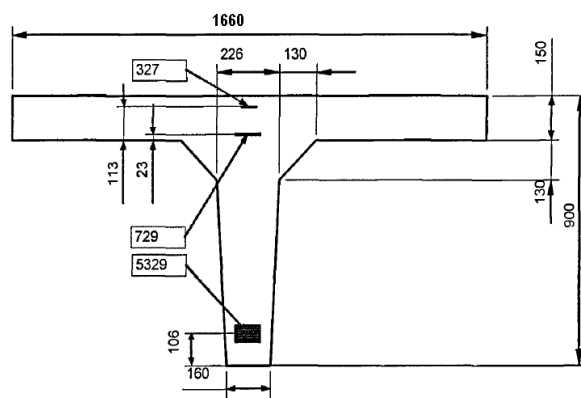


Рис. 1. Поперечное сечения главной балки

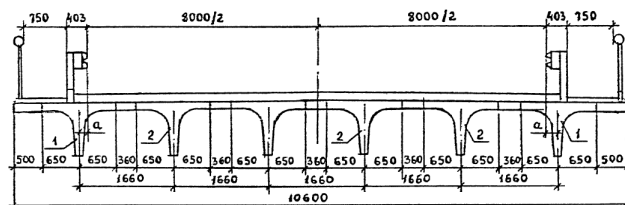


Рис. 2. Схема сечения пролетного строения

Расчет пролетного строения производился на действия постоянной нагрузки от собственного веса и временной нагрузки 1,2 НК-80 (рис. 3), которая устанавливалась в середине пролета в крайнее левое положение.

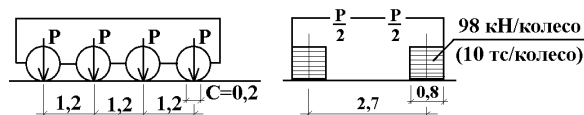


Рис. 3. Схема нагрузки НК-80

Поперек прогона во время монтажа балки объединяют в пространственную систему прогонной конструкции в уровне толщины полок балки (15 см) замоноличиванием продольных стыков шириной 0,36 м с петлевыми выпусками арматуры.

### 3. Конечно-элементная модель

Моделирование проводилось в программе Femap с встроенным решателем NX Nastran (Femap with NX Nastran). Femap with NX Nastran имеет достаточно широкие возможности для создания геометрической и конечно-элементной модели самых разнообразных конструкций, позволяет выполнять практически любые виды анализа и, что имеет особую ценность, оптимизировать параметры конструкции при заданных ограничениях. Конечно-элементная (КЭ) модель с краевыми условиями и условиями анализа готовилась в среде Femap. Затем требуемый анализ выполнялся в NX Nastran, а результаты визуализировались и документировались в среде Femap.

Моделирование проводилось в последовательности по рекомендациям приведенным в (Volotsiuga, Shynder Yu 2013). Была создана трехмерная конечно-элементная модель одного пролета типовой мостовой конструкции. Железобетон моделировался за счет создания двух отдельных свойств – арматуры и бетона с соответственным заданием материалов. Ключевым тут является обеспечение совместной работы двух материалов, что было обеспечено за счет объединения узлов сетки КЭ арматуры и бетона. Бетон моделировался твердотельным пространственным КЭ типа Solid в виде шестигранных тетраэдров (Tetra). Арматура – линейным элементом типа Beam с заданием ему свойств поперечного сечения и соответственного присвоения материала. Отдельные стержни арматуры сведены к единому сечению с суммарной площадью которое размещено в центре тяжести соот-

ветственных стержней (рис.1). Вид КЭ модели балки в разрезе представлен на рис. 4.

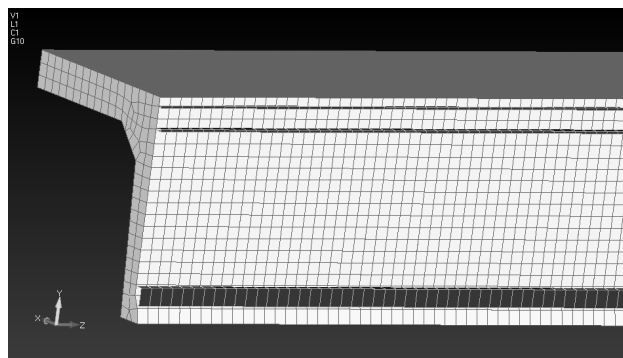


Рис. 4. Сечения КЭ модели балки по оси симметрии

Опираие балок смоделировано в виде шарнирно-неподвижной и подвижной опор по 0,3 м от края. Кроме того, элементы Beam закреплены в одной точке (каждый стержень) против поворота вокруг собственной оси. Нагрузка НК-80 приложена у соответствии к схеме, имитирована в виде вертикальной равномерно распределенной силы, приложенной на восьми площадках от давления колес размером 0,2 × 0,8 м (рис. 5). Постоянные нагрузки от дорожного покрытия задавались равномерно распределенной нагрузкой по всей площади верхней грани объединенной плиты (рис. 5 условно не показано).

Нагрузки и граничные условия прикладывались к узлам модели, поскольку при расчете программа любые другие их варианты перераспределяет к узловым.

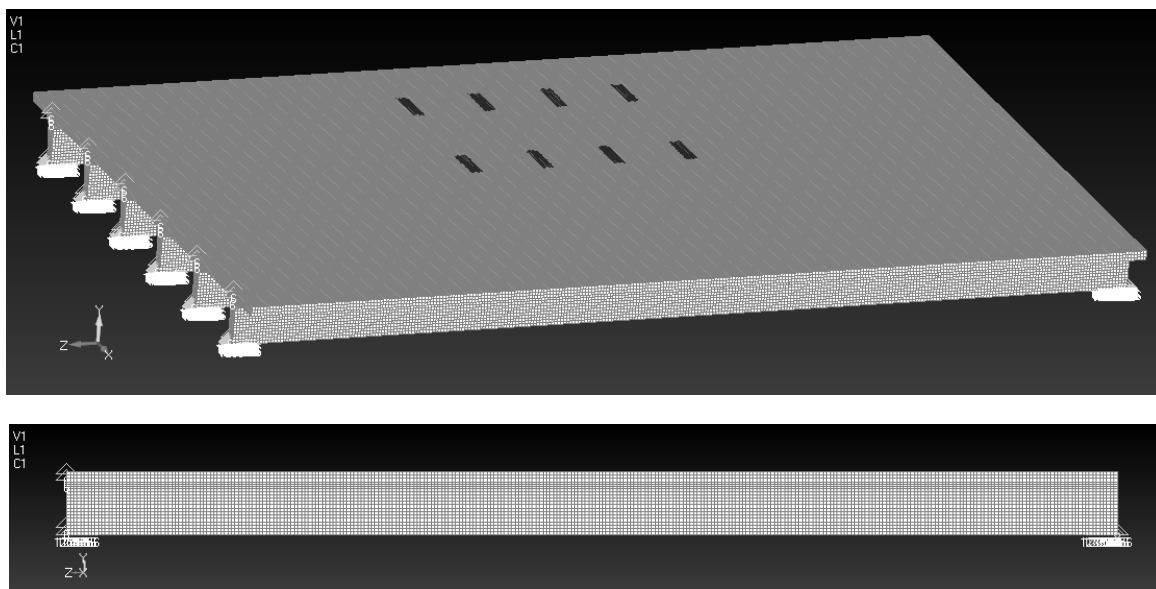


Рис. 5. Общий и боковой вид на модель

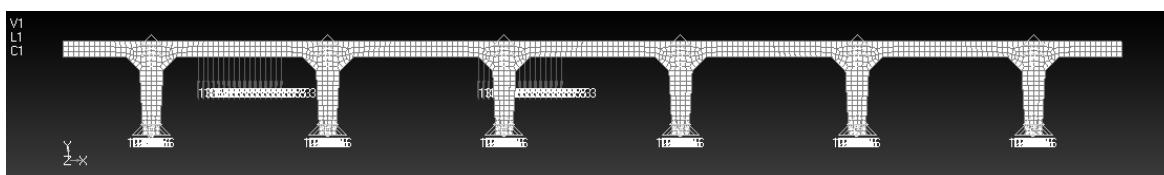


Рис. 6. Торцевой вид на модель

Параметры КЭ модели представлены в табл. 1.

Таблица 1. Параметры КЭ трехмерной модели

Число узлов	411 166
Число элементов	329 400

После выполнения проверки корректности построенной модели были подготовлены условия упругого статического анализа в Femap и модель отправлена на расчет решателем NX Nastran.

Для эффективного и корректного использования ПК Femap NX Nastran, использовались рекомендации и инструкции, приведенные в (Рычков 2013), (Рудаков 2011), (Шимкович 2008) и др.

#### 4. Характеристики материала

Значения основных констант, определяющих механические свойства материалов железобетонной конструкции, которые использовались в расчетах, приведены в табл. 2.

Таблица 2. Механические свойства материалов

	Единица измерения	Бетон В25	Арматура А-III
Модуль упругости	МПа	30 000	200 000
Коэффициент Пуассона	–	0,25	0,32
Предел прочности на сжатие	МПа	14,5	390
Предел прочности на растяжение	МПа	1,05	390

Нелинейные свойства материалов не учитывались. При необходимости, могут быть использованы модели нелинейно пластического, упруго-пластического (билинейного) и пластического поведения материалов.

#### 5. Анализ результатов

В результате проведенного расчета получено напряженно-деформированное состояния рассматриваемой модели. Так, средние напряжения по бетону достигают максимального значения 7,3 МПа непосредственно в месте давления колес транспортного средства (рис. 7).

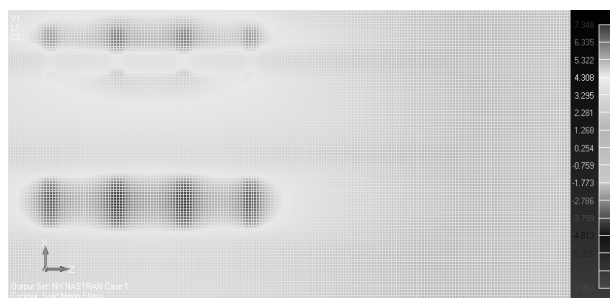


Рис. 7. Средние напряжения в Solid элементах (вид сверху)

Максимальные перемещения тела бетона составили 26,4 мм и они находятся непосредственно под местом приложения нагрузки НК-80 в одной из двух полос движения транспорта. Деформированная модель приведена на рис. 8.

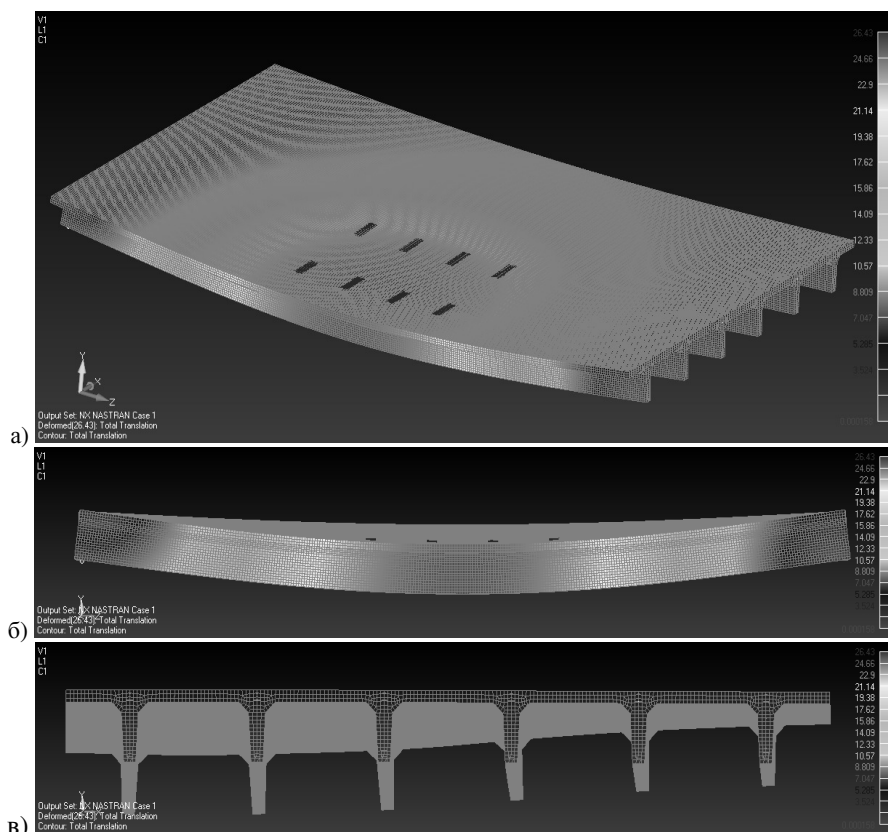


Рис. 8. Деформированная модель: а – общий вид; б) вид слева; в) торцевой вид

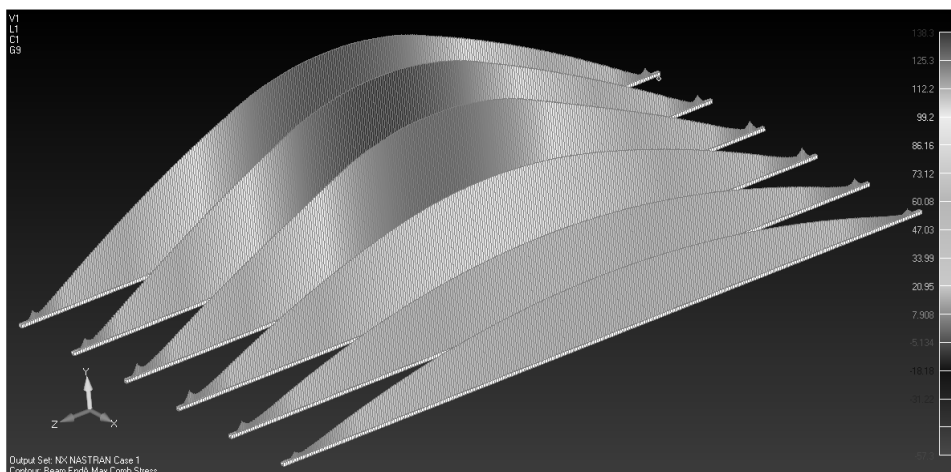


Рис. 9. Максимальные нормальные напряжения в нижней растянутой арматуре пролетного строения

Максимальные нормальные напряжения в сечении нижней растянутой арматуры составили 138,3 МПа (рис. 9), нормальные усилия – 685,7 кН.

На рис. 8 и рис. 9 хорошо видно пространственную работу конструкции. На рис.9 видно, что во время приложения нагрузки НК-80 в крайнее левое положения (то есть, нагрузка находится на одной из двух полос движения) максимальные напряжения возникают в нескольких крайних балках, а напряжения в других балках значительно ниже.

Таким образом, можно проводить моделирование и расчет методом конечных элементов разных по сложности железобетонных конструкций, при необходимости, учитывая нелинейные свойства материалов, процессов нагружения и других факторов для

максимально приближенного к реальности результата расчета.

### Выводы

Программным комплексом Femap with NX Nastran проведено моделирование напряженно-деформированного состояния железобетонной пространственной плитно-ребристой автомобильной мостовой системы за типичным проектом с ненапрягаемой арматурой по серии 3.503.1-73 Союздорпроекта. Рекомендуется использования Femap with NX Nastran для моделирования железобетонных мостовых конструкций, как одного из универсальных пакетов реализовывающих метод конечных элементов.

### Литература

- Volotsiuga, V.; Shnyder, Yu. 2013. *Use of modern finite element analysis packages in calculations of reinforced concrete bridges*. Geodesy, Architecture & Construction: Proceedings of the 5th International Conference of Young Scientists GAC-2013. – Lviv: Lviv Polytechnic Publishing House, 2013. – Electronic edition on CD-ROM.
- Гасенко, А. В.; Пігуль, О. В.; Маган, І. В. 2010. *Моделювання напружено-деформованого стану без капітельних вузлів монолітного залізобетонного перекриття із сталобетонними колонами*. / Вісник СНАУ, 11(14). Серія «Будівництво», с. 53–60.
- Дмитренко, Т. 2013. *Використання новітніх комп'ютерних технологій при чисельному дослідженні напружено-деформованого стану будівельних конструкцій* / Вісник НУ ЛП № 751, с. 346–350.
- Рудаков, К. Н. 2011. *ФЕМАР 10.2.0. Геометрическое и конечно-элементное моделирование конструкций*. К.: НТУУ „КПИ“, 2011. 317 с.
- Рычков, С. П. 2013. *Моделирование конструкций в среде Femap with NX Nastran*. М.: ДМК Пресс. 784 с.
- Чередников, В. Н.; Гасенко, А. В.; Крупченко, А. А. 2013. *Численные исследования напряженно-деформированного состояния железобетонных колон производственного цеха*. / Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди / Збірник наукових праць. Випуск 27. Полтава, с. 266–273.
- Шалобыта, Н. Н.; Масилевич, А. В.; Шалобыта, Т. П. 2013. *Особенности идеализации в расчетах железобетонных элементов сечений сложной формы*. // Строительство и архитектура / Вестник Брестского государственного технического университета. № 1, Брест, с. 135–139.
- Шимкович, Д. Г. 2008. *Femap & Nastran. Инженерный анализ методом конечных элементов*. М.: ДМК Пресс. 704 с.