

Интернет-журнал «Транспортные сооружения» / Russian Journal of Transport Engineering <https://t-s.today>

2024, Том 11, № 2 / 2024, Vol. 11, Iss. 2 <https://t-s.today/issue-2-2024.html>

URL: <https://t-s.today/PDF/06SATS224.pdf>

DOI: 10.15862/06SATS224 (<https://doi.org/10.15862/06SATS224>)

2.1.8. Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей (технические науки)

УДК 624.21/8

Обзор программных комплексов для расчета и проектирования мостовых сооружений

¹Нюхина Н.С., ¹Мазур Е.В., ²Ибрагимова А.А.

¹ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта (МИИТ)», Москва, Россия

²ФГБОУ ВО «Казанский государственный
архитектурно-строительный университет», Казань, Россия

Автор, ответственный за переписку: Нюхина Наталия Сергеевна, e-mail: natali.nns2001@mail.ru

Аннотация. В контексте развития современных технологий и постоянного увеличения требований к безопасности, надежности и долговечности мостовых сооружений, правильный выбор расчетного программного комплекса является одним из ключевых факторов для успешного выполнения проектов. Программные комплексы представляют собой специализированные инструменты, разработанные для помощи инженерам в процессе проектирования и расчета мостовых сооружений. Такие программы включают в себя различные модули и функции, которые позволяют проводить анализ и расчет различных типов мостов и предоставляют возможность их моделирования и визуализации. В статье представлен обзор программных комплексов, предназначенных для расчета и проектирования мостовых сооружений.

Программные комплексы разделяются на три группы: универсальные программы, работающие на основе метода конечных элементов (МКЭ), различные системы автоматизированного проектирования (САПР), которые ориентированы на создание объектов гражданского строительства и специализированные

программы, разработанные для расчета мостовых конструкций.

В обзоре приведены основные характеристики каждого программного комплекса, такие как функциональность, возможности по расчету и проектированию различных типов мостовых сооружений, поддерживаемые стандарты и нормативные документы, возможность задания различных видов материалов и нагрузок, доступные инструменты для моделирования и вывода результатов расчета.

Основная мысль статьи заключается в том, что выбор программного комплекса для расчета и проектирования мостовых сооружений является важным шагом, который может существенно повлиять на их качество и безопасность. Авторы призывают к тщательному анализу и выбору программного комплекса, учитывая его функциональность, надежность и соответствие современным стандартам и требованиям.

Ключевые слова: программный комплекс; расчет; проектирование; модель; метод конечных элементов; мостовое сооружение; нагрузка; материал

Software package review for calculation and design of bridge structures

¹Natalia S. Nyukhina, ¹Evgeny V. Mazur, ²Aniia A. Ibragimova

¹Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia

²Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russia

Corresponding author: Natalia S. Nyukhina, e-mail: natali.nns2001@mail.ru

Abstract. In the context of modern technologies development and the constant safety requirements increase, reliability and durability of bridge structures, the correct choice of a calculation software package is one of the key factors for the successful implementation of projects. Software packages are specialised tools developed to assist engineers in the process of designing and calculating bridge structures. Such programs include various modules and functions that allow the analysis and calculation of different types of bridges and provide their modelling and visualisation possibilities. The article presents an overview of software packages designed for the calculation and design of bridge structures.

The software packages are divided into three groups: universal programs based on the finite element method (FEM), various computer-aided design systems (CAD), which are oriented to the creation of civil objects

engineering construction and specialised programs developed for the calculation of bridge structures.

The review provides the main characteristics of each software package, such as functionality, capabilities to calculate and design different types of bridge structures, supported standards and regulations, the ability to specify different types of materials and loads, available tools for modelling and output of calculation results.

The main idea of the article is that the software package choice for the calculation and design of bridge structures is an important step that can significantly affect their quality and safety. The authors call for a careful analysis and selection of the software package, taking into account its functionality, reliability and compliance with modern standards and requirements.

Keywords: software package; calculation; design; model; finite element method; bridge structure; load; material

Данная статья доступна по лицензии Creative Commons “Attribution” («Атрибуция») 4.0 Всемирная

This article is available under the Creative Commons “Attribution” 4.0 Global License



Введение

Introduction

Среди проектировщиков мостовых сооружений известна традиция: когда первый поезд проезжал по мосту, автор проекта должен был находиться под ним и гарантировать надежность сооружения своей собственной жизнью. Впервые для демонстрации качества своей работы инженеры-проектировщики встали под мост при проезде по нему первого поезда при открытии моста через р. Обь в 1896 году.

Этот смелый эксперимент в дальнейшем стал обязательным условием по договору при проектировании и строительстве мостов.¹

В те годы самым передовым инструментом для проведения расчетов конструкций являлась логарифмическая линейка. Для мостовых сооружений были характерны запасы прочности и избыточное использование материалов.

В нашей эпохе мы столкнулись с появлением новых передовых строительных технологий, инновационных материалов и сложных конструктивных форм.

В настоящее время нельзя представить проектирование и расчеты мостовых конструкций без применения современных программных комплексов.

Проектирование мостов требует точных расчетов и учета различных факторов. К ним предъявляются высокие требования обеспечения надежности и долговечности², поскольку от них напрямую зависит безопасность людей.

При таком положении вещей выбор автоматизированного программного комплекса для расчета мостовых сооружений является для инженера-проектировщика одной из важнейших задач.

Существует множество расчетных программ, которые могут использоваться при проектировании мостов.

К ним относятся универсальные программы, работающие на основе метода конечных элементов (МКЭ), различные системы автоматизированного проектирования (САПР), которые ориентированы на создание объектов гражданского строительства и специализированные программы, разработанные для расчета мостовых конструкций.

¹ «Ответственность ценой жизни»: зачем в Российской империи люди стояли под мостом во время его открытия // Дзен — URL: <https://dzen.ru/a/Y71D3KgPwFu4k1du> (дата обращения 18.02.2024).

² СП 35.13330.2011. Мосты и трубы. Актуализированная редакция СНиП 2.05.03-84. — М.: Центр проектной продукции в строительстве, 2011. — 341 с.

В этой статье мы рассмотрим ряд программных комплексов, которые возможно использовать при проектировании и расчете мостовых сооружений.

1. Универсальные расчетные комплексы метода конечных элементов

1. Universal calculation complexes of the finite element method

Метод конечных элементов (МКЭ) — численный метод решения дифференциальных уравнений в инженерных и физических задачах. Предполагается, что цельная конструкция рассматривается как совокупность отдельных конечных элементов [1; 2].

1.1 Ansys

Ansys — это многоцелевой пакет программ для численного моделирования физических процессов и явлений в области прочности, гидрогазодинамики, теплофизики, электромагнетизма, акустики [3–5]. Разработчиком программы является ANSYS, Inc., США.

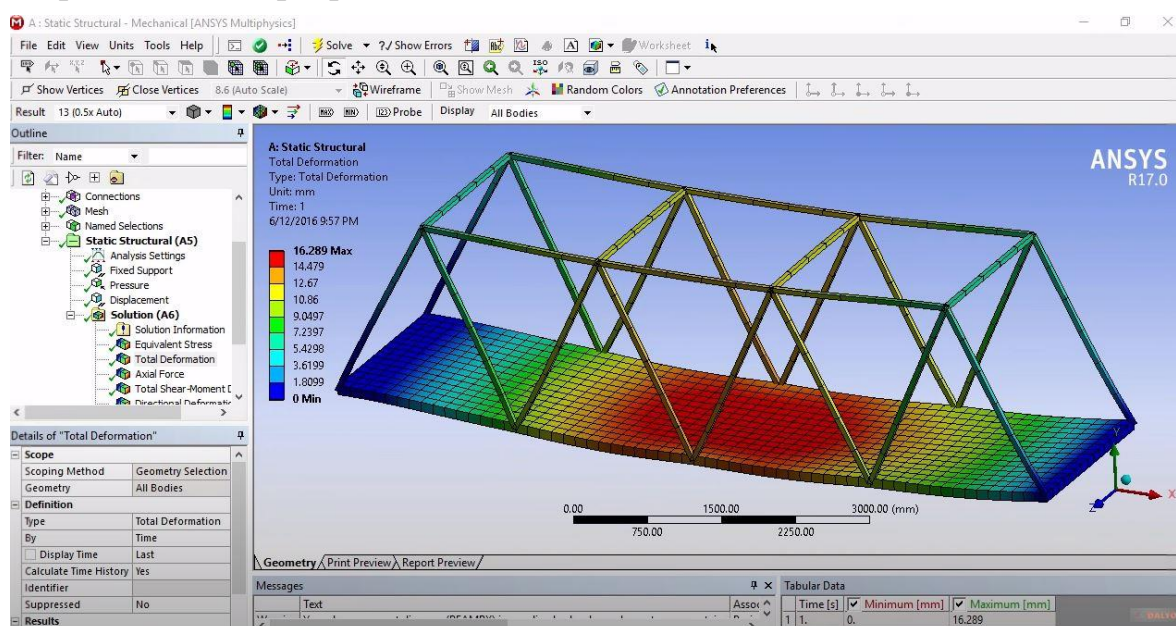


Рисунок 1. Модель пролетного строения с решетчатыми главными фермами в среде Ansys Mechanical (источник: <https://www.youtube.com/watch?v=J0cCA1PAINU>)

Figure 1. Lattice main truss span model in Ansys Mechanical (source: <https://www.youtube.com/watch?v=J0cCA1PAINU>)

Среда Ansys Workbench является основным инструментом, на котором базируется концепция «Проектирование изделий на основании результатов инженерных расчетов». Разработано несколько программ Ansys, доступных для среды Ansys Workbench, интеграция между

которыми позволяет облегчить подготовку расчетов и решение сложных задач из различных областей.³

Наиболее подходящими для расчета мостовых конструкций программами Ansys являются: Ansys Motion, Ansys Mechanical (рис. 1), Ansys Composite.

Ansys Motion.

Ansys Motion — программа, используемая при расчете твердых и упругих тел, учитывающая род их взаимодействий. Программа позволяет рассчитывать собственные частоты и формы колебаний этих тел, их тепловое состояние, анализ усталостной долговечности, а при загрузке дополнительного пакета инструментов позволяет расширить ряд этих функций. Особенностью Ansys Motion является возможность бессеточного моделирования.⁴

Одним из дополнительных инструментов можно выделить EasyFlex, который позволяет рассчитывать напряженно-деформируемое состояние тел без генерации расчетной сетки.

Ansys Mechanical.

Ansys Mechanical — программа, используемая при расчете твердых тел с учетом нелинейных свойств материалов. Кроме этого, она не лишена возможности решения и линейных задач.⁵

Ansys Mechanical обладает большим спектром связей, например линейные и нелинейные контакты взаимодействия, шарниры, слияние узлов сетки и т. д. В этой программе возможно создание моделей различных материалов (вязкопластичные, упругие, ортотропные, пористые, хрупкие, и др.). Большим плюсом является возможность моделирования поведения композиционных материалов, учет предварительного натяжения болтов, моделирования болтовых соединений, импорт граничных условий.

Ansys Mechanical позволяет вести расчет сейсмических, монтажных, инерционных, тепловых нагрузок, проводить анализ усталостной долговечности. Помимо этого, программа дает возможность определения напряженно-деформированного состояния конструкции с учетом линейности/нелинейности материалов.

³ Ansys Workbench // CAE Expert. Интегратор технологий ANSYS в России и странах СНГ — URL: <https://cae-expert.ru/product/ansys-workbench> (дата обращения 18.02.2024).

⁴ Ansys Motion // CAE Expert. Интегратор технологий ANSYS в России и странах СНГ — URL: <https://cae-expert.ru/product/ansys-motion> (дата обращения 18.02.2024).

⁵ Ansys Mechanical // CAE Expert. Интегратор технологий ANSYS в России и странах СНГ — URL: <https://cae-expert.ru/product/ansys-mechanical> (дата обращения 18.02.2024).

Вывод результатов доступен в различной вариации: цветами, векторами, изоповерхностями, анимацией.

Ansys Composite.

Для расчетов конструкций из композиционных материалов применима программа Ansys Composite PrepPost.⁶

Ansys Composite PrePost обладает постпроцессором, который позволяет оценивать прочность композиционных изделий по специально разработанным и подходящим для них критериям. Работу упрощает возможность оценивания требуемых характеристик в каждом слое материала.

Особенностью изделий из композиционных материалов является изменение исходной формы и приобретение отличного от начального напряженно-деформированного состояния в процессе отверждения, что влияет на дальнейшую работу конструкции. Ansys Composite Cure Simulation позволяет учитывать данную особенность и минимизировать появление негативных эффектов. Внутри Ansys Composite PrePost создается слоистый материал, а в Ansys Composite Cure Simulation происходит дальнейшая работа с ними и анализ полученных результатов.

1.2 MSC.Nastran

Продукты MSC.Software Corporation (США), объединенные единым названием MSC.visualNastran, представлены тремя категориями программ [6]:

Enterprise — программное обеспечение для проведения полного комплекса моделирования, исследований и расчетов: MSC.Nastran, MSC.Patran, MSC.Fatigue, MSC.Dytran, MSC.Marc, MSC.AMS, MSC.Mvision, MSC.SuperModel.

Professional — совокупность интегрированных систем и модулей для профессионального инженерного анализа: MSC.Nastran for Windows, MSC.Nastran (Marc, Dytran) System.

Desktop — «облегченные», несложные для понимания и освоения системы анализа, ориентированные на широкий круг пользователей (конструкторы, инженеры-проектировщики, технологи и т. д.): MSC.visualNastran Desktop 4D, MSC.SuperForge.

Более подробно рассмотрим программный комплекс MSC.Nastran, как наиболее часто используемый при проектировании и расчете мостов (рис. 2).

⁶ Ansys Composite // CAE Expert. Интегратор технологий ANSYS в России и странах СНГ — URL: <https://cae-expert.ru/product/ansys-composite> (дата обращения 18.02.2024).

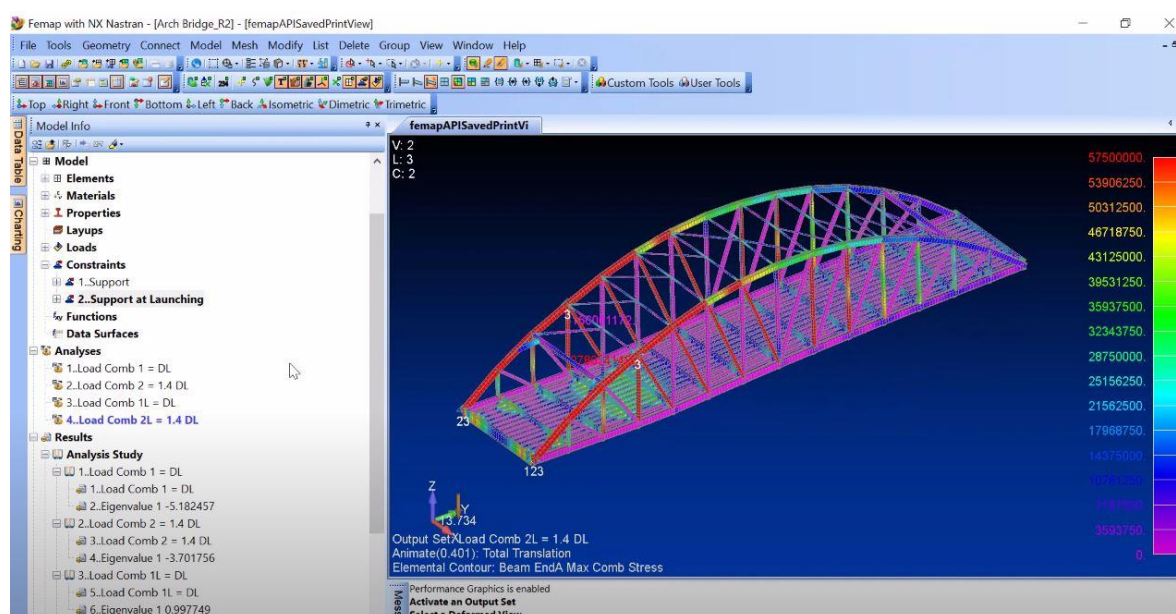


Рисунок 2. Модель арочного пролетного строения в программном комплексе MSC.Nastran (источник: <https://www.youtube.com/watch?v=nwnK6hSgkII>)

Figure 2. Arch span model in MSC.Nastran
(source: <https://www.youtube.com/watch?v=nwnK6hSgkII>)

MSC.Nastran (Nasa STRuctural ANalysis) — программа, в функционал которой входит как линейный, так и нелинейный прочностной анализ, исследования устойчивости, динамический анализ и анализ воздействия частот и температур, расчет напряженно-деформированного состояния, исследование установившихся и неустойчивых процессов, спектральный анализ и исследование аэроупругости [7]. Программа обладает возможностью моделирования различных типов материалов, включая композиционные [8].

В MSC.Nastran существует возможность проведения сложных поэтапных расчетов при изменении нагрузений, граничных условий и любых других параметров конструкции.

MSC.Nastran — это инструмент не только для расчета конструкций, но и для их оптимизации в автоматическом режиме, что является отличительной особенностью программы. Оптимизация происходит путем изменения параметров формы, размеров и свойств конструкции. Изменять можно различные характеристики, такие как вес, напряжения, перемещения, собственные частоты и другие. С помощью этих изменений возможно изучение влияния различных параметров на поведение и изменение конкретной характеристики. Таким образом появляется возможность управлять процессом поиска оптимального решения. MSC.Nastran предлагает методы оптимизации, которые помогают согласовать расчетные модели с экспериментальными данными. Подход заключается в минимизации отклонений результатов расчета от данных

эксперимента и выбор наименее достоверных расчетных параметров конструкции в качестве варьируемых параметров.

MSC.Nastran обладает функцией минимизации веса конструкции при соблюдении условий по прочности в результате оптимизации геометрии изделия. Результатом такой оптимизации является оптимальная в весовом отношении конструкция.

Программа используется для планирования экспериментов, таких как определение мест расположения датчиков, и оценки полноты экспериментальных данных.

1.3 COSMOS/M

COSMOS/M — это законченная, модульная, замкнутая конечно-элементная система, разработанная Structural Research and Analysis Corporation (США) для персональных конструкций и рабочих станций. Программа позволяет проводить линейные и нелинейные расчеты на статику и динамику, существует возможность расчета усталостных задач [9].

Система COSMOS/M включает различные модули анализа, рассмотрим некоторые из них.

Модуль GEOSTAR.

GEOSTAR — среда трехмерного моделирования, в которой осуществляется генерация сетки конечных элементов и проводится их анализ. С его помощью пользователь может создавать модель, вводить необходимую информацию для анализа, выполнять анализ, используя расчетные модули COSMOS/M, и визуально оценивать результаты [10].

В модуле GEOSTAR возможна работа в любой заранее заданной системе координат.

Плюсом GEOSTAR является возможность взаимодействия с системой AutoCAD с помощью импорта или экспорта модели в формате dxf.

Модули STAR и STRESS.

STAR — модуль для определения деформаций, а при совместной работе с модулем STRESS возникает возможность расчета напряжений, возникающих в элементах конструкции.

В модулях STAR и STRESS существует возможность задания различного рода материалов (изотропных, ортотропных, анизотропных, композиционных) и нагрузок (тепловые, весовые, центробежные, балочные).

К постпроцессорным возможностям модулей относятся:

- вывод деформаций и напряжений в различных вариациях (цветами, векторами, изоповерхностями, изолиниями, анимацией);
- автоматический выбор экстремальных значений смещений и напряжений;
- вывод и визуализация сдвиговых и моментных компонент балочных элементов;
- комбинирование смещений и компонент напряжения различных вариантов нагружений.

Модуль DSTAR.

Модуль DSTAR предназначен для вычисления собственных частот и форм колебаний конструкции, критических нагрузок и форм потери устойчивости.

Определение собственных частот в модуле DSTAR осуществляется различными методами: отыскание собственных значений итераций в подпространстве (вплоть до 150 значений), Ланцоша (вплоть до 150 значений), Якоби (все собственные значения), обратный степенной (одно собственное значение). Существует возможность определения комплексных собственных значений, собственных значений в заданной частотной области путем задания частотного сдвига и учета влияния плоской нагрузки на жесткость.

К постпроцессорным возможностям модуля относятся:

- вывод собственных частот и форм колебаний конструкции [11];
- вывод экстремальных значений форм колебаний конструкции;
- визуализация и анимация форм колебаний конструкции.

1.4 Abaqus

Abaqus — программный комплекс, разработанный компанией Abaqus, Inc. (США) в 1978 году и предназначенный для расчета линейных и нелинейных задач (рис. 3).

Abaqus включает в себя следующие основные модули:

- [Abaqus/Standard](#);
- [Abaqus/Explicit](#);
- [Abaqus/CAE](#);
- [FE-Safe](#);
- [Abaqus for CATIA V5](#).

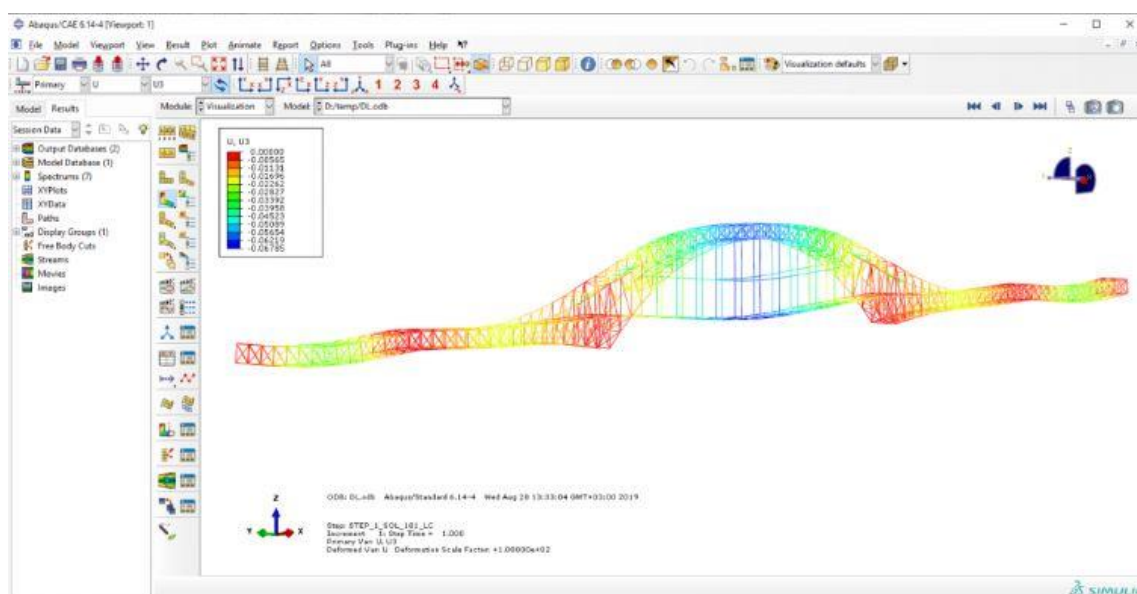


Рисунок 3. Модель пролетного строения моста Банхва в программном комплексе Abaqus (источник: <https://skyciv.com/ru/docs/tech-notes/structural-3d/higher-order-fem-verification/>)

Figure 3. Banhwa Bridge span model in Abaqus software package (source: <https://skyciv.com/ru/docs/tech-notes/structural-3d/higher-order-fem-verification/>)

Abaqus включает в себя два вида анализа: обобщенный (в которых задача может быть линейной или нелинейной) и линеаризованный (в котором линейный отклик модели рассчитывается относительно общего — возможно, нелинейного — исходного состояния) [12; 13]. Один расчет может включать различные типы анализов.

Abaqus позволяет проводить статический и динамический анализ напряжений и перемещений, переходной или установившийся анализ теплопередачи и диффузии массы.

В Abaqus существует возможность задания различного рода материалов: изотропные, анизотропные, композиционные, предусмотрены возможности учета линейных и нелинейных упругих, упругопластических и упруговязкопластических закономерностей.

Abaqus предоставляет возможность моделирования как конструкции, так и сплошной среды. Элементы могут задавать одно-, двух- и трехмерными, в виде балок, мембран, оболочек. Расчет балок и оболочек основывается на учете изгибных и сдвиговых деформаций (теория Кирхгофа).

Граничные условия включают в себя задание закрепления в одной точке или многоточечных связей, и, если нужно, состояние основания.

Существует возможность задания сосредоточенных сил, распределенной, тепловой, центробежной нагрузок, нагрузки от давления, нагрузки от болтов и других крепежных деталей.

Могут быть заданы начальные условия для температур, скоростей, напряжений и других полей. Помимо этого, Abaqus позволяет учитывать взаимодействие между телами, такие как контакт между поверхностями с учетом или без учета трения.

2. Системы автоматизированного проектирования

2. Computer-aided design systems

2.1 MicroFe-СДК

MicroFe-СДК — программный комплекс, основанный на методе конечных элементов и решающий задачи по расчету конструкций на прочность, устойчивость и колебания. Разработчиком программы является ООО «ТЕХСОФТ», Россия. В его возможности входит расчет задач как в линейной, так и нелинейной постановке [14].

В MicroFe-СДК помимо основных расчетов (прочность, устойчивость, колебания) есть возможность проводить дополнительные расчеты, например: расчет на прогрессирующее разрушение, фиксация погрешностей, определение спектральных свойств матрицы, расчет на сейсмическое (динамическое) воздействие с учетом работы нелинейных связей.

Программа предоставляет возможность учета этапности и технологии возведения конструкции с возможностью просмотра интересных результатов по каждому этапу.

MicroFe-СДК находится в постоянном сотрудничестве с организациями, которые разрабатывают нормы по проектированию сооружений, что позволяет реализовывать новые нормативные документы после их издания.

MicroFe-СДК предоставляет возможность учитывать реальные размеры и особенности строительных конструкций. Например, специальные инструменты помогают корректно моделировать стыки конструкции, соответствующие реальным связям, причем некоторые из них могут быть сгенерированы автоматически.

Само формирование модели в предпроцессорном пространстве представлено понятными инженерными терминами (балка, плита, колонна и др.). Существует возможность использования в качестве подосновы слоев из графических программ в формате dxf, dwg. Создавать модель можно как на плоскости, так и в пространстве в любой удобной системе координат.

Расчет конструкций ведется на сосредоточенные и распределенные нагрузки (с возможностью преобразования в узловые), температурные нагрузки, подвижные нагрузки, преднапряжение.

2.2 ЛИРА-САПР

ЛИРА-САПР — самый распространенный в России программный комплекс, используемый для проектирования и расчета инженерных сооружений. Разработчиками программы являются компании НИИАСС, Лира-софт и Лира-САПР, Украина. Программа позволяет решать задачи любого уровня сложности, от самых простых до повышенной сложности.⁷

ЛИРА-САПР предоставляет возможность для расчета линейно- и нелинейно-деформированных конструкций на статические и динамические воздействия, подбора и проверки сечений элементов, подготовки эскизов рабочих чертежей конструкций металлических (КМ) и некоторых железобетонных элементов. При расчете конструкций возможно учитывать этапность возведения с просмотром результатов на каждом из этапов.

ЛИРА-САПР имеет удобный и продуманный интерфейс. В этой программе возможно открытие нескольких расчетных схем в одном окне, что удобно для их сравнения. Созданы несколько лент с командами, адаптированных под разные инженерные условия, например отдельная лента для расчета и конструирования железобетонных или стальных конструкций. Помимо этого, существует возможность создания своей ленты команд. На всех этапах проектирования можно создавать книгу отчета и получать необходимую информацию в графическом или табличном виде.

ЛИРА-САПР состоит из специализированных расчетных модулей, позволяющих рассчитывать различные виды металлических и железобетонных конструкций. Эти модули позволяют:

- Моделировать отдельные элементы или конструкции в целом, изготавливаемых из железобетона или стали.
- Реализовать подбор площадей сечения арматуры конструкций по первой и второй группам предельных состояний.
- Редактировать и создавать сортаменты прокатных и сварных профилей.
- Конструировать сечения элементов и вычислять их характеристики (изгибные, крутильные, сдвиговые и т. п.).

⁷ Программа для проектирования и расчета строительных конструкций // LIRALAND Group — URL: <https://lira.land/lira/> (дата обращения 21.02.2024).

- Построить в автоматизированном режиме полный набор чертежей КМ.
- Моделировать процесс монтажа конструкции.
- Рассчитывать мостовые конструкции разных статических схем (балочные, арочные, вантовые (рис. 4), висячие) и получить поверхности влияния усилий от подвижной нагрузки в заданном сечении.
- Учитывать различные факторы динамических воздействий (ветер, сейсмика, вибрационные нагрузки, удар).
- Конструировать и выводить чертежи армирования, спецификацию арматуры, ведомость расхода стали.

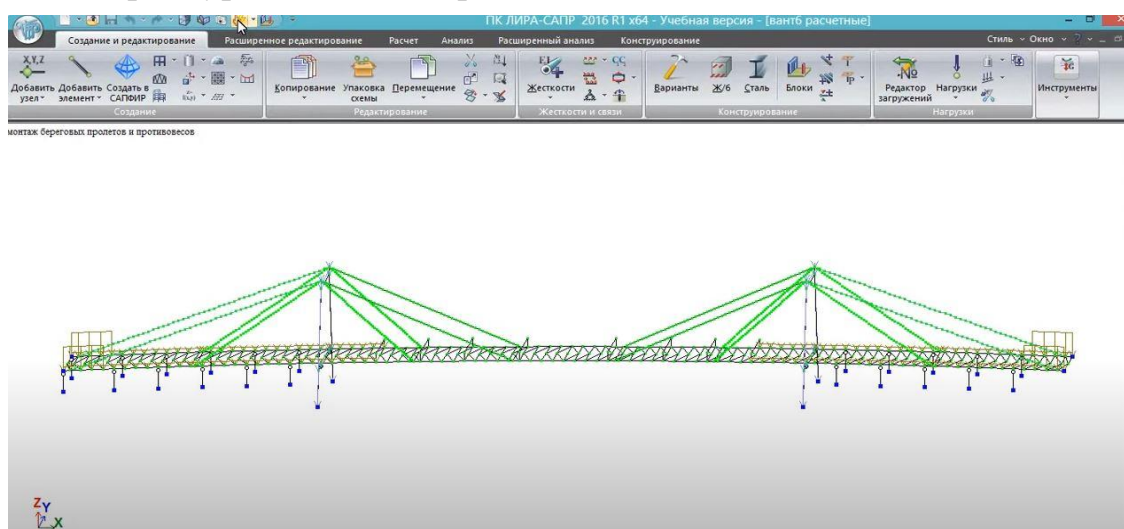


Рисунок 4. Модель вантового пролетного строения в программном комплексе ЛИРА-САПР (источник: https://www.youtube.com/watch?v=b4obi1_aGII)

Figure 4. Model of cable-stayed span in LIRA-FEM software package (source: https://www.youtube.com/watch?v=b4obi1_aGII)

ЛИРА-САПР опирается на нормативную документацию не только России, но и других стран, что позволяет использовать программу для работы над международными проектами.

2.3 SCAD Office

SCAD Office — набор программ, предназначенных для выполнения прочностных расчетов и проектирования различного вида строительных конструкций.⁸ Разработчиком программы является компания SCAD, Россия.

⁸ Карпиловский В.С. SCAD OFFICE. Вычислительный комплекс SCAD / В.С. Карпиловский, Э.З. Криксунов, А.А. Маляренко, М.А. Микитаренко, А.В. Перельмутер, М.А. Перельмутер — Москва: Изд-во СКАД СОФТ, Издательство Ассоциации строительных вузов, 2012. — 657 с. — URL: <https://djuv.online/file/VRHlwsQzwA1yZ> (дата обращения: 21.02.24).

Структура SCAD Office:

- Structure CAD — вычислительный комплекс, в котором выполняется расчет и анализ конструкций различного уровня сложности.
- Конструктор сечений, КОНСУЛ, ТОНУС, СЕЗАМ — комплексы для моделирования сечений и расчета их геометрических характеристик.
- ВЕСТ — расчет нагрузок и воздействий на сооружение.
- КРИСТАЛЛ — проверка и расчет элементов стальных конструкций на соответствие требованиям нормативных документов.
- АРБАТ — проверка и расчет элементов железобетонных конструкций на соответствие требованиям нормативных документов.
- КОМЕТА — разработка конструкторской документации стальных конструкций.
- МОНОЛИТ — разработка конструкторской документации железобетонных конструкций.

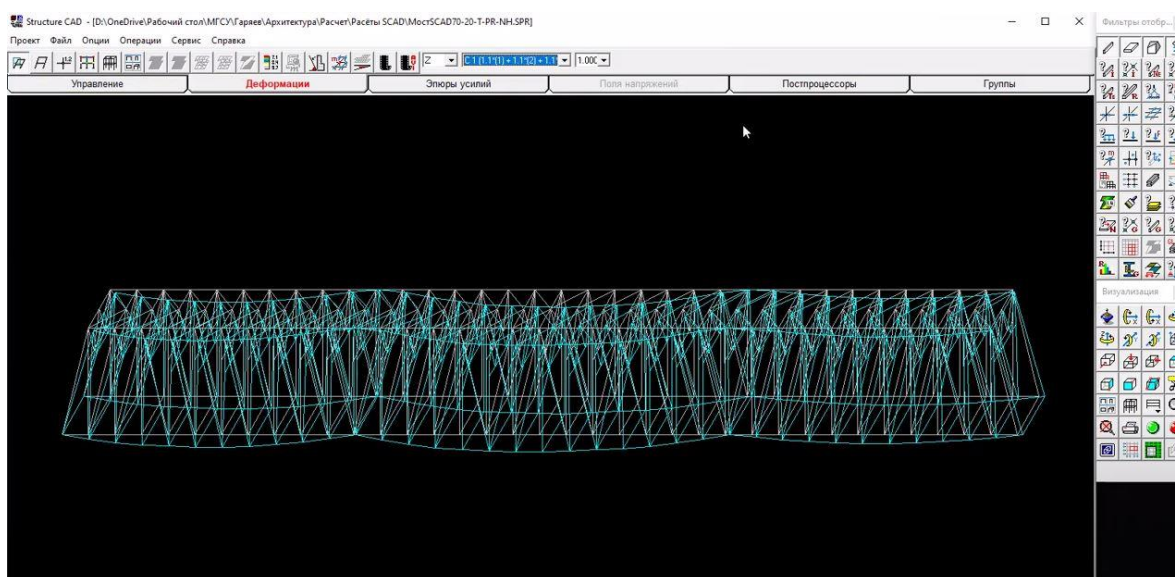


Рисунок 5. Модель пролетного строения с решетчатыми главными фермами в программном комплексе SCAD Office (источник: <https://www.youtube.com/watch?v=J8Z5uPwHZFA>)

Figure 5. Model of a span with lattice main trusses in SCAD Office software package (source: <https://www.youtube.com/watch?v=J8Z5uPwHZFA>)

Формирование расчетной схемы или ее части может быть выполнено как в самом пространстве SCAD (рис. 5), так и на основе информации, импортируемой форматах dxf и dwg системы AutoCAD. Для просмотра

определенной части модели в системе существует возможность удаления с экрана монитора информации, которая в данный момент не требуется. Это относится к типам элементов (стержни, оболочки, пластины), положению элемента в пространстве (горизонтальные, вертикальные), отображению различных данных (различного типа нагрузки, нумерация элементов и узлов и т. д.).

Определение нагрузок и воздействий, действующих на конструкцию, осуществляется в программе ВЕСТ [15] в соответствии с рекомендациями СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия». Программа включает нагрузки от собственного веса конструкции, временные, ветровые, снеговые, температурные.

SCAD Office способен выполнять статический и динамический расчеты линейных и нелинейных систем, расчет главных и эквивалентных напряжений, анализ устойчивости конструкции, определение частоты собственных колебаний конструкции. Кроме этого, существует возможность подбора сечений стальных конструкций или арматуры в железобетонных элементах. Результаты расчетов и проверок можно выводить в графическом виде, в текстовом или табличном форматах.

Расчет стальных конструкций ведется в программе КРИСТАЛЛ [15] согласно требованиям СП 16.13330.2017 «Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81*». В программе доступен выбор различных марок стали, сортамента металлопроката и болтов. Существует возможность просмотра предельных гибкостей элементов, коэффициентов условий работы, расчетных длин элементов и построение огибающих эпюр моментов и поперечных сил. В КРИСТАЛЛ реализованы расчет геометрических характеристик элементов, местной устойчивости стенок и поясов изгибаемых и сжатых элементов, проверка на прочность, общую устойчивость и предельную гибкость элементов.

Расчет железобетонных конструкций ведется в программе АРБАТ [15] согласно требованиям СП 63.13330.2018 «Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения СНиП 52-01-2003». Расчет ведется по предельным состояниям первой и второй группы. Программа осуществляет возможность подбора и проверки существующей арматуры (прочность, трещиностойкость), вычисления прогибов в балках, проверки элементов на местное действие нагрузок (местное сжатие, отрыв и т. д.), а также расчета закладных деталей.

2.4 GeomechaniCS

GeomechaniCS — программный комплекс, предназначенный для решения геотехнических задач (статическая и динамическая совместная

работа грунтового массива и сооружений, определение осадки, напряжений, устойчивости и несущей способности грунта и т. п.) [16]. Разработчиком программы является группа компаний CSoft, Россия.

Программный комплекс состоит из трех модулей: QUASISTATIC, FILTRATION и THERMOELAST. Каждый из них предназначен для расчета напряженно-деформированного состояния сооружений совместно с грунтовым массивом от действия нагрузок с учетом различных факторов. В модуле QUASISTATIC проводится прочностной расчет, модуль FILTRATION учитывает фильтрационные параметры пластов грунтовой среды, а THERMOELAST — фазовые переходы замораживания-оттаивания и нагрев. Все модули учитывают упруго-вязко-пластическое поведение материалов и фактор времени.

GeomechanICS состоит из трех процессоров, препроцессора и постпроцессора.

Процессор выполняет расчетные функции модулей, перечисленных выше. В препроцессоре создается и запускается на расчет модель сооружения.

Работа в препроцессоре начинается с выбора типа проекта (модуля): прочностной расчет, расчет напряженно-деформированного состояния с учетом фильтрационных свойств или расчет термоупругого напряженно-деформированного состояния. Основные элементы модели — объемы, первоначально их форма куб или прямоугольный параллелепипед. При необходимости можно задавать автоматизацию создания подобных объемов через указание направления смещения и количества копирования вдоль координатных осей.

Библиотека материалов включает материалы, часто используемые в практической деятельности. Библиотека материалов открыта для редактирования и расширения перечня материалов.

Нагрузка прикладывается к соответствующей грани объема. Существует четыре типа нагрузки: двойной треугольник, синусоидальная нагрузка, нагрузка, моделирующая экспоненциально-затухающие гармонические колебания и ручное распределение нагрузки по шагам (позволяет распределить величину нагрузки путем задания коэффициентов на каждый шаг расчета). Задается время действия нагрузки в секундах (для прочностного расчета) или в сутках.

Существует возможность задания граничного вектора ненулевых перемещений и ненулевого граничного вектора напряжения четырьмя способами: табличным, в виде двухзвенной ломанной, гармоническими колебаниями и затухающими гармоническими колебаниями.

При расчете напряженно-деформированного состояния с учетом фильтрационных свойств можно создавать скважины — области в объемах, моделирующие закачку (откачку) жидкости.

При сборке модели обратить внимание на граничные условия нижних граней всех объемов, перемещения в грани должны быть запрещены. Существует автоматическое «закрепление» нижних граней.

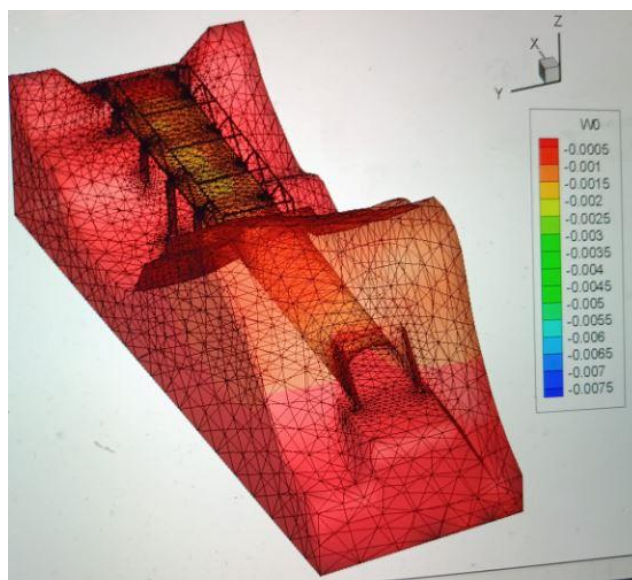


Рисунок 7. Модель мостового сооружения на подходе к тоннелю в программном комплексе GeomechanCS (модель составлена авторами)

Figure 7. Model of the bridge structure at the tunnel approach in GeomechanCS software package (model compiled by the authors)

Результаты расчета предоставляет постпроцессор (рис. 7). Рабочие файлы постпроцессора бывают трех видов: plot_deviat — расчет напряжений и деформаций, plot_main — расчет компонент тензора напряжений и вектора перемещений и plot-strains — расчет компонента тензора деформаций. Выводить результаты расчета можно в различном виде — графики, трехмерные поля с цветовой индикацией рассчитанных параметров, изоповерхности, изолинии, двумерные поля в заданных сечениях и др.

3. Specialized complexes for bridge calculations

3. Specialised packages for bridge calculation

3.1 Midas Civil

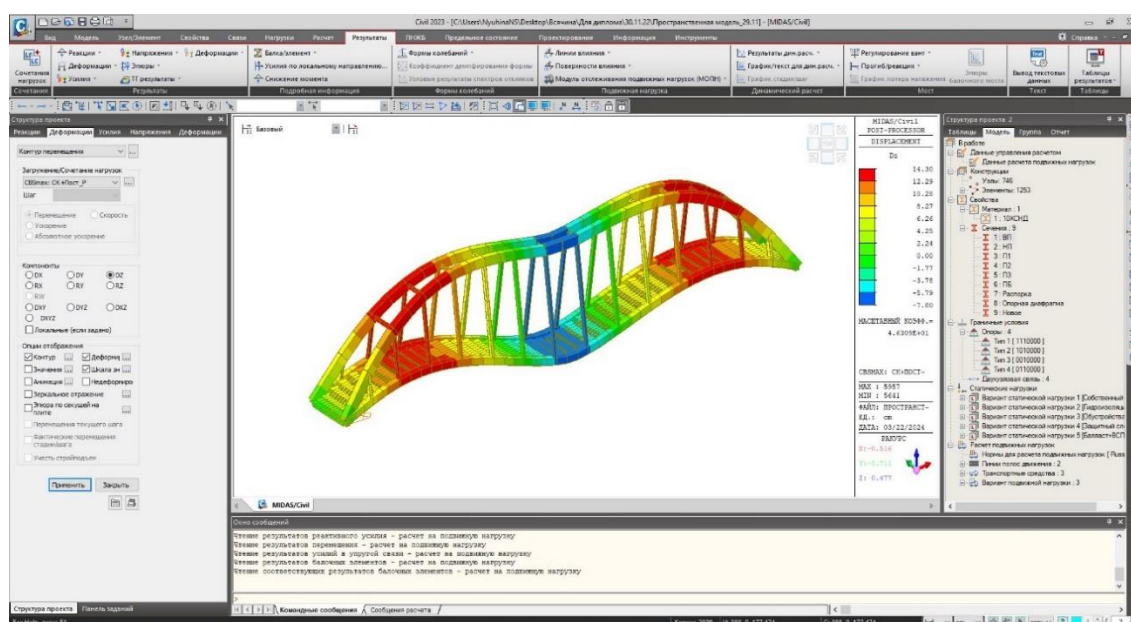
Midas Civil — один из лидеров среди программных комплексов, специализирующихся на расчетах и проектировании мостовых сооружений. Разработчиком программы является MIDAS Information

Technology Co., Ltd., Южная Корея, в России она используется с 2003 года.⁹

Основная отметка пользователей заключается в том, что интерфейс системы интуитивно понятен. Пользователи отмечают логичную последовательность создания и расчета мостовой конструкции и высококачественную 3D-визуализацию, которая позволяет оценить поведение конструкции при различных нагрузках.

Создавать модель мостового сооружения в Midas Civil можно разными способами. Первый из способов — создавать модель в пространстве программы с нуля, используя узлы и различные по типам элементы (ферменные, плитные, плосконапряженные, осесимметричные, плоскодеформированные, объемные и т. д.). Второй способ — использование встроенных мастеров для создания различных типов мостов (балочные, арочные (рис. 7), фермы, висячие, вантовые, сталежелезобетонные и предварительно-напряженные мосты и т. д.). И третий способ — импорт модели из AutoCAD в формате dxf [17].

Кроме этого, Midas Civil позволяет моделировать различные способы монтажа мостового сооружения (продольная надвигка, навесной монтаж, передвижные подмости, сплошные подмости) с возможностью анализа каждого этапа.



*Рисунок 7. Модель арочного пролетного строения
в программном комплексе Midas Civil (модель составлена авторами)*

**Figure 7. Model of arch span in
Midas Civil software package (model compiled by the authors)**

⁹ Midas Civil // Официальный сайт Midas Soft — URL: <https://midasoft.ru/products/midas-civil/> (дата обращения: 28.02.24).

В программе присутствует большая библиотека материалов и сечений элементов по различным нормам. Среди материалов — сталь, бетон (с учетом ползучести, усадки и набора прочности), сталежелезобетон или ручной ввод характеристик материала. В расчетах учитываются нелинейные характеристики материалов, такие как физическая нелинейность бетона, физическая нелинейность арматурной стали и физическая нелинейность в стальных конструкциях. Сечения элементов доступны в разнообразной конфигурации, существует возможность задания предварительно-напряженного, комбинированного, переменного, составного сечения, сечений стальных мостов (коробчатое и двутавровое). Доступны сечения прокатных элементов различных сортов.

Нагрузки, задаваемые на модель, делятся по типам: статические (существует возможность задания узловой нагрузки, нагрузки, распределенной на элемент или на поверхность), температура/преднапряжение, динамические (собственные формы и частоты колебаний конструкции), осадка, теплота гидратации (отражает изменение модуля упругости, эффекты ползучести и усадки, последовательность заливки бетонной конструкции), подвижная (доступны различные нормы для нагрузок), стадии возведения. Возможна комбинация этих нагрузок в различных вариантах загрузки, которые задаются самостоятельно или автоматически.

При расчете на действие подвижных нагрузок программа строит линии и поверхности влияния, огибающие или соответствующие усилия, существует возможность отображения нагружения линий влияния нагрузкой с указанием необходимых коэффициентов.

Вывод результатов возможен в виде эпюр, деформированного вида конструкции, анимации.

Особенностью Midas Civil является наличие специальных модулей, позволяющих выполнять автоматизированные проверки конструкций по различным нормам, в том числе и по СП 35.13330.2011 «Мосты и трубы. Актуализированная редакция СНиП 2.05.03-84». По результатам этих проверок может быть сгенерирован отчет с промежуточными вычислениями, расчетной схемой сооружения и ссылками на нормативный документ.

3.2 SOFiSTiK

SOFiSTiK — программный комплекс, разработанный компанией SOFiSTiK AG в Германии, использующий для расчета строительных сооружений (зданий, тоннелей, мостов) метод конечно-элементного анализа. Программный комплекс состоит из набора модулей,

ориентирующихся на подготовку исходных данных, выполнение различных расчетов и отображение результатов расчета в графическом и текстовом форматах.¹⁰ В SOFiSTiK полностью реализованы расчеты по российским нормативным документам.

SOFiSTiK включает в себя проектирование и расчет мостовых сооружений любого типа: по материалу — железобетонные (обычные и преднапряженные), стальные, деревянные и композитные мосты, по статической схеме — балочные (рис. 8), арочные, вантовые, висячие и т. д. В SOFiSTiK возможно моделирование различных методов монтажа мостовых сооружений (уравновешенный навесной монтаж, надвигка на опоры и т. д.).

SOFiSTiK предоставляет возможность задания подвижных нагрузок различных норм (с возможностью их графического вывода), нагрузки от осадки фундаментов, температуры, ветра, столкновения и усилия от домкратов.

В возможности программы входит вывод линий и поверхностей влияния, расчет собственных форм и частот, анализ сейсмических воздействий и спектров отклика, анализ устойчивости, динамический анализ ветра, учет первичных деформаций и напряжений в конструкции и т. д.

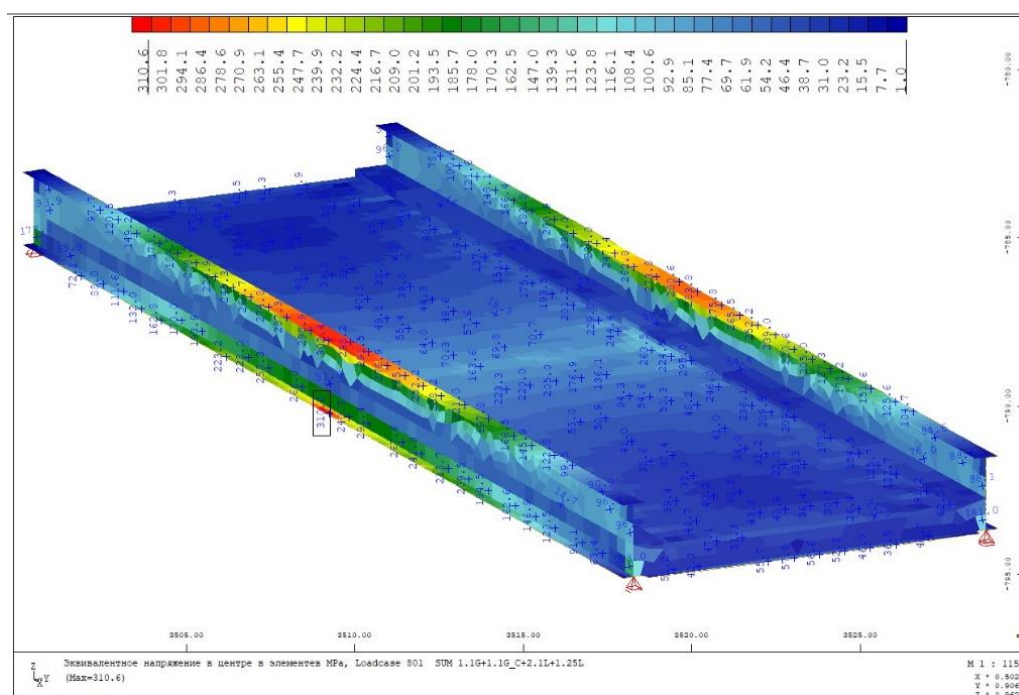


Рисунок 8. Модель балочного пролетного строения
в программном комплексе SOFiSTiK (модель составлена авторами)

Figure 8. Model of girder span in SOFiSTiK
software package (model compiled by the authors)

¹⁰ SOFiSTiK // Официальный сайт SOFiSTiK — URL: <https://www.sofistik.com/en/> (дата обращения: 28.02.24).

Одной из основных особенностей этого комплекса, по сравнению с другими расчетными программами, такими как Midas Civil, Лира и SCAD, является возможность учета взаимодействия сооружений с грунтом [18]. Этот комплекс позволяет выполнить расчеты, учитывая подработку грунтовых массивов в условиях плотной застройки, а также учесть ветровые и динамические нагрузки и другие факторы, такие как проектирование подземных сооружений с сложной конфигурацией и пересечениями в пространстве, фильтрация воды и другие.

Система отличается наличием встроенного языка программирования, который позволяет пользователю самостоятельно разрабатывать модули для обработки нетипичных конструкций.

Это дает возможность настраивать систему под индивидуальные требования каждого проекта и открывает широкие возможности для создания сложных и уникальных конструкций при достаточном владении системой и хорошей теоретической подготовке.

К дополнительным возможностям SOFiSTiK относится учет строительного подъема конструкции, формы опалубки при монтаже, оптимизация разных типов результатов, контроль геометрии и монтажа, взаимодействие с транспортом, нелинейные итерации во времени, анализ турбулентности для поперечных сечений.

Программный комплекс поддерживает импорт и экспорт данных в форматах dwg и dxf.

SOFiSTiK предназначен в основном для опытных инженеров, так как для полного освоения всех ее функций требуется высокий уровень подготовки в теории метода конечных элементов.

3.3 RM Bridge

RM Bridge — программный комплекс австрийского производства компанией BENTLEY SYSTEMS.¹¹

RM Bridge — программа, позволяющая проектировать, рассчитывать и анализировать мостовые сооружения всех возможных статических схем: вантовые (рис. 9), висячие, арочные, балочные и т. д.

Что касается материалов, то здесь программа может работать с любыми их типами: обычный и преднапряженный железобетон, сталь, композит.

¹¹ About Bridge Information Modeling // Bentley official website. — URL: <https://www.bentley.com/> (дата обращения: 28.02.24).

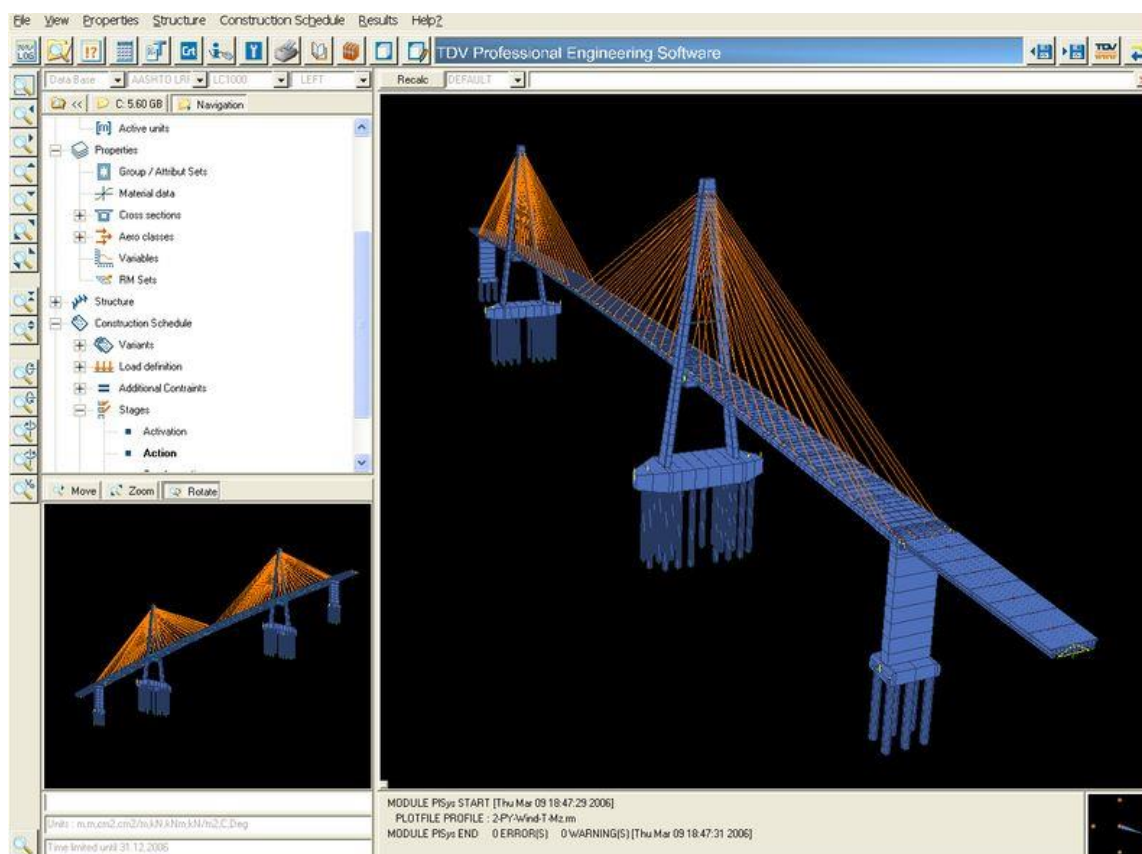


Рисунок 9. Модель вантового моста в программном комплексе RM Bridge
(источник: <https://www.csoft.ru/soft/bentley-rm-bridge/bentley-pm-bridge-8.html>)

Figure 9. Model of cable bridge in RM Bridge software package
(source: <https://www.csoft.ru/soft/bentley-rm-bridge/bentley-pm-bridge-8.html>)

В программном комплексе RM Bridge реализованы российские нормативные документы по проектированию и расчетов мостов, что позволяет выполнять все основные проверки (прочность, устойчивость, выносливость, трещиностойкость). В программе выполняется и линейный, и нелинейный анализ конструкции. Большое удобство доставляет высокий уровень постпроцессорной графики и наличие документации не только на английском, но и на русском языке.

Плюсом и отличительной особенностью RM Bridge является сквозная параметризация исходных данных конечно-элементной модели, которая позволяет вносить изменения в модель, не создавая новые параметрические данные [19]. То есть, любая численная характеристика модели может быть задана параметром, при изменении которого модель автоматически перестраивается, что значительно сокращает время для расчета конструкции.

Ещё одной ключевой возможностью RM Bridge является учет способов монтажа, графика строительства конструкции, осуществление контроля в процессе ее эксплуатации. Другими словами, программа дает возможность моделировать мост в динамике, то есть создавать

трехмерную модель мостового сооружения с учетом временной составляющей. RM Bridge учитывает изменение характеристик материала во времени (ползучесть и усадка бетона, релаксация стали), что позволяет планировать этапность строительства. Такая особенность дает возможность решать задачи до начала строительства.

RM Bridge является незаменимой программой при анализе динамической работы мостового сооружения. Программа содержит различные модули по динамической работе конструкций, например по аэродинамике вантовых мостов. В программе доступен сейсмический анализ конструкции.

RM Bridge имеет функцию «проверки стабильности», т. е. после расчета вариантов нагрузки программа автоматически увеличивает нагружение до возникновения бифуркации. При расчете допустимой нагрузки конструкции используется нелинейный анализ при различных значениях приращения нагрузки. Это позволяет получить результаты из эпюр предельных нагрузок, которые были рассчитаны при помощи программы.

3.4 CSiBridge

CSiBridge — еще одна зарубежная система (США), используемая для расчета и проектирования мостов. С помощью этой программы инженеры могут создавать модели мостовых сооружений различного уровня сложности. Модели могут создаваться параметрически.¹²

В CSiBridge представлен единый пользовательский интерфейс для моделирования, расчета, проектирования, вывода результатов и создания отчетов, доступен многооконный режим [19].

Для быстрого создания мостового сооружения доступен выбор шаблона модели, а затем, с помощью различных модификаций шаблона, достигается необходимая модель сооружения. Редактирование моделей доступно в табличном виде, что облегчает и ускоряет внесение изменений. Существует возможность экспорта и импорта этих таблиц в Microsoft Excel и Microsoft Access.

В CSiBridge существует возможность параметрического моделирования с помощью объектной модели моста (комплексная сборка сооружения). Программа предоставляет возможность определения переменных для описания геометрии моста в целом или его отдельных элементов. Объектная модель включает в себя моделирование пролетных

¹² CSiBridge // НИП-Информатика. — URL: <https://steel-concrete.ru/products/csi/csibridge/> (дата обращения: 28.02.24).

строений, опор, диафрагм, настила и т. п. Для создания модели используется инструмент «Мастер создания мостов», позволяющий пошагово создавать модель моста с пояснениями для каждого шага.

CSiBridge имеет большой выбор параметрических сечений пролетных строений: коробчатые, двутавровые, U-образные и т. д. Диафрагмы пролетных строений могут быть заданы железобетонными и стальными, скошенными, перекрестными и зигзагообразными как на опорах, так и вдоль пролетов. Можно задавать внутренние диафрагмы стальных балок. CSiBridge имеет библиотеку стандартных железобетонных, стальных и композитных сечений разных стран, в том числе и России.

CSiBridge позволяет моделировать преднапряженные элементы с возможностью расчета нагрузок от предварительного напряжения, включая все потери [20].

Для моделирования мембран, плит, оболочек используются плоские элементы, материал которых может быть как однородным, так и слоистым. Для моделирования объектов, в которых нагрузка, граничные условия и т. п. изменяются в зависимости от толщины элементов, используются объемные элементы.

Нагрузки, задаваемые в программе, делятся на точечные, линейные и плоскостные. В CSiBridge существует возможность задания параметрического нагружения нагрузками. Нагрузки, заданные параметрически, изменяются автоматически при изменении параметров модели. Для задания временной подвижной нагрузки используется нагружение полос движения (которые заранее задаются) транспортными средствами. Существуют стандартные транспортные средства, но возможно создавать пользовательские.

В программе имеется возможность проводить расчет подвижной нагрузки для определения линий и поверхностей влияния для полос движения на мостовых конструкциях. Можно использовать эту функцию для расчета временных нагрузок от транспортных средств. Расчет может быть выполнен как пошаговым статическим методом, так и во временной области. При этом возможна как линейная, так и нелинейная постановка задачи.

Расчет потери устойчивости в CSiBridge может производиться как в линейной, так и в нелинейной постановке, с учетом и без учета этапов возведения конструкции. Программа позволяет проводить динамические расчеты, например определять форму и частоту собственных колебаний конструкции.

CSiBridge имеет функцию «Поэтапное возведение» — расчет, позволяющий определять последовательность возведения конструкции с возможностью изменения модели на каждом этапе монтажа.

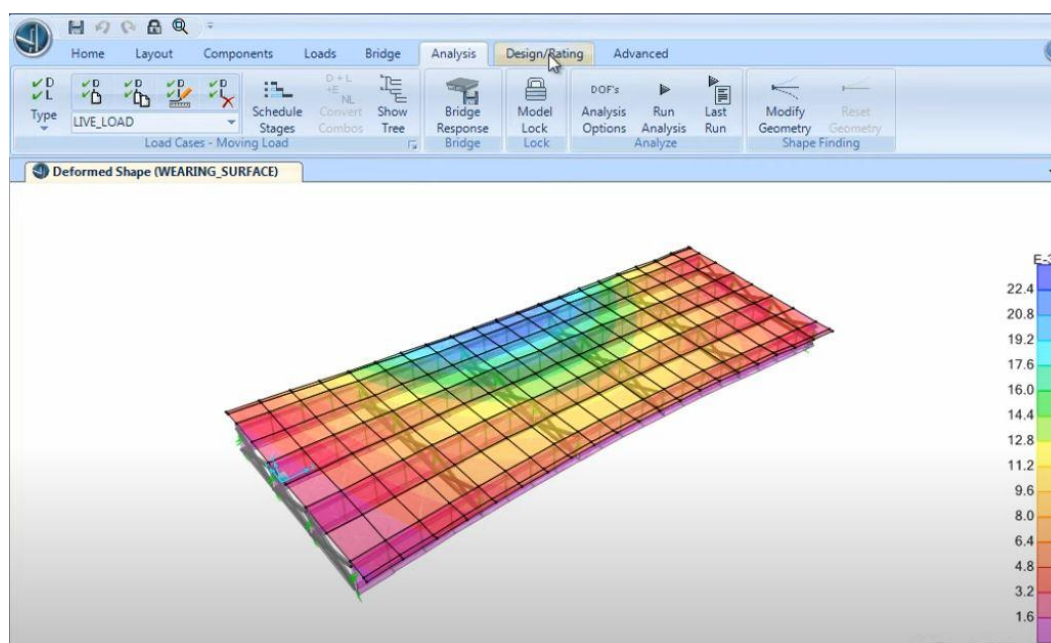


Рисунок 10. Модель балочного пролетного строения в программном комплексе CSiBridge (источник: <https://www.youtube.com/watch?v=akwBiLw9izg&list=PLEEB44B80E21640D8&index=12>)

Figure 10. Model of a girder span in CSiBridge software package (source: <https://www.youtube.com/watch?v=akwBiLw9izg&list=PLEEB44B80E21640D8&index=12>)

Программа позволяет отображать деформированную схему сооружения от любого нагружения (рис. 10), анимацию деформаций. Эпюры внутренних усилий и перемещений можно просматривать вдоль длины элемента и отображать их максимальные значения. В программе доступно построение отклика моста от подвижных нагрузок (перемещение узлов, реакции в узлах, усилия в элементах, напряжения и т. д.), поверхностей влияния запрашиваемого параметра.

Программа предоставляет возможность анимировать движение транспортных средств и других нагрузок на модели моста, что помогает лучше понять его поведение. Кроме того, можно создавать видеофайлы, чтобы наглядно представить результаты расчетов, например, при анализе временных изменений или при учете подвижных нагрузок от нескольких транспортных средств.

В CSiBridge существуют дополнительные инструменты, такие как «Оптимизатор нагрузок» и «Конструктор сечений». Программа предлагает оптимизатор нагрузок, который позволяет рассчитать наиболее эффективное распределение нагрузок для достижения требуемого отклика конструкции. Конструктор сечений позволяет создавать пользовательские сечения нестандартных форм и размеров, используя любые материалы.

CSiBridge поддерживает импорт и экспорт данных в форматах dwg и dxf.

Заключение

Conclusion

В заключение, на основании проведенного обзора, можно сделать следующие выводы:

1. Рассмотренные в первом разделе программные комплексы (Ansys, MSC.Nastran, COSMOS/m, Abaqus) имеют мощный функционал, но в них отсутствуют специальные возможности, необходимые для расчета мостовых сооружений (построение линий влияния для расчета на подвижные нагрузки).¹³ Из-за этого их можно рассматривать только в виде вспомогательных, а не самостоятельных комплексов для расчета и проектирования мостов.

2. Программные комплексы, рассмотренные во втором разделе (MicroFe-СДК, ЛИРА-САПР, SCAD Office), в большей степени фокусируются на проектировании промышленно-гражданских конструкций. Применение их для расчета и проектирования мостов возможно, однако эти программы имеют недостаток функционала.

3. Применение программных комплексов, рассмотренных в третьем разделе (Midas Civil, SOFiSTik, RM Bridge, CSiBridge) усложняет тот факт, что не все из них адаптированы для проектирования по нормам нашей страны и не все имеют одинаковые возможности.

4. В современном мире использование импортных программных комплексов становится все сложнее и дороже из-за изменяющейся экономической и политической обстановки. В связи с этим возрастает интерес к отечественным программным продуктам, которые могут предложить не только аналогичный функционал, но и ряд преимуществ. Например, программный комплекс GeomechaniCS подходит как для расчета промышленно-гражданских конструкций, так и для расчета и проектирования мостовых сооружений.

Невозможно найти идеальный расчетный комплекс, который подходил бы под все типы мостовых сооружений. Каждое программное обеспечение имеет ряд достоинств и недостатков, поэтому для полноты картины о возможностях системы инженер должен на собственном опыте выявлять сильные и слабые стороны программ. Оптимальным решением будет использование в своей работе нескольких программных комплексов.

¹³ Петров В.А. Как выбрать программу для расчёта мостов // Ирисофт. Решения, ведущие к успеху. Блог инженерно-консалтинговой компании. — URL: <http://irisoft.livejournal.com/100241.html> (дата обращения: 29.02.2024).

Для достижения высокого уровня качества требуемых расчетов инженерам-проектировщикам рекомендуется использовать при своих расчетах не менее двух сертифицированных программных комплексов. Сравнительный анализ полученных результатов также является важным этапом данного процесса. Эта рекомендация нашла широкое применение в развитых странах мира и некоторых российских проектных организациях.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Сегерлинд, Л.** Применение метода конечных элементов / Л. Сегерлинд. — Перевод с английского канд. физ.-мат. наук А.А. Шестакова, под редакцией д-ра физ.-мат. наук Б.Е. Победри. — Москва: Изд-во «Мир», 1979. — 392 с. — URL: <https://djvu.online/file/BfwAfdHENVPpn> (дата обращения: 18.02.2024).
2. **Kenneth, H.** Huebner The Finite Element Method for Engineers / K.H. Huebner, D.L. Dewhirst, D.E. Smith, T.G. Byrom. — Wiley, 2001. — 744 с. — URL: https://www.google.ru/books/edition/The_Finite_Element_Method_for_Engineers/g6KSEAAAQBAJ?hl=ru&gbpv=0 (дата обращения: 18.02.2024).
3. **Федорова, Н.Н.** Основы работы в ANSYS 17 / Н.Н. Федорова, С.А. Вальгер, М.Н. Данилов, Ю.В. Захарова. — Москва: ДМК, 2017. — 210 с. — URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/02000023857> (дата обращения: 18.02.2024).
4. **Мансурова, А.Р.** Применение программного комплекса ANSYS в компьютерном моделировании / А.Р. Мансурова // Молодой ученый. — 2018. — № 39. — С. 31–33. — URL: <https://moluch.ru/archive/225/52800/>. (дата обращения: 18.02.2024).
5. **Stolarski, T.** Engineering Analysis with ANSYS Software / T. Stolarski, Y. Nakasone, S. Yoshimoto. — Elsevier Science, 2018. — 562 с. — URL: <https://books.google.ru/books?id=50IyDwAAQBAJ> (дата обращения: 18.02.2024).
6. **Девятков, С.В.** Компьютерные технологии инженерного анализа в новом тысячелетии / С.В. Девятков // CADmaster. — 2002. — № 5. — С. 2–10. — URL: https://www.cadmaster.ru/magazin/articles/cm_15_msc_software.html. (дата обращения: 18.02.2024).
7. **Матвеев, Н.В.** Об использовании программного комплекса MCS.NASTRAN для анализа напряженно-деформированного состояния железобетонных элементов / Н.В. Матвеев, Н.Н. Шалобыта, В.Н. Малиновский // Вестник Брестского государственного технического университета. Серия: Строительство и архитектура. — 2014. — № 1. — С. 80–82. — URL: <https://rep.bstu.by/handle/data/2258>. — EDN YTRSMH. (дата обращения: 18.02.2024).
8. **Turner, T.L.** Analysis of SMA Hybrid Composite Structures in MSC.Nastran and ABAQUS / T.L. Turner, H.D. Patel. — DOI <https://doi.org/10.1177/1045389X06066699> // Journal of Intelligent Material Systems and Structures. — 2007. — Т 18. — № 5. — С. 435–447. — URL: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/1045389X06066699>. (дата обращения: 18.02.2024).
9. **Девятков, С.В.** Программы семейства COSMOS — универсальный инструмент конечно-элементного анализа / С.В. Девятков // CADmaster. — 2002. — № 1. — С. 17–23. — URL: https://www.cadmaster.ru/magazin/articles/cm_11_cosmos.html. (дата обращения: 18.02.2024).
10. **Szabó, F.J.** Comparison of Programming Ansys and COSMOS/M Finite Element Systems / F.J. Szabó. — DOI <https://doi.org/10.32972/dms.2022.020> // Design of Machines and Structures. — 2022. — Т 12. — № 2. — С. 110–119. — URL: <https://real.mtak.hu/153618/>. (дата обращения: 18.02.2024).
11. **Нестеров, В.А.** Расчет колебаний композитных стержней в пакете cosmos/M / В.А. Нестеров, А.С. Суханов // Решетневские чтения. — 2015. — Т 1. — С. 120–122. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25004376>. — EDN VBELFR. (дата обращения: 18.02.2024).
12. **Рыжков, С.** ABAQUS — многоцелевой конечно-элементный комплекс для инженерного анализа / С. Рыжков // САПР и графика. — 2003. — № 1. — URL: <https://sapr.ru/article/6736>. (дата обращения: 18.02.2024).

13. **Rao, S.S.** The Finite Element Method in Engineering / S.S. Rao. — Elsevier Science, 2017. — 782 с. — URL: <https://books.google.ru/books?id=XN0kDwAAQBAJ> (дата обращения: 18.02.2024).
14. **Семенов, В.А.** Программный комплекс прочностных расчетов конструкций MicroFe: опыт разработки, внедрения в практику проектирования и переподготовки специалистов / В.А. Семенов // Открытое образование. — 2012. — № 6. — С. 88–96. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=18411295>. — EDN PMXGLH. (дата обращения: 21.02.2024).
15. **Хохлов, А.А.** Система автоматизированного проектирования SCAD Office / А.А. Хохлов // Новые информационные технологии в науке: сборник статей по итогам Международной научно-практической конференции, Челябинск, 29 декабря 2017 года. Том Часть 3 / Челябинск: Агентство международных исследований, 2017. — С. 152–154. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=31777476>. — EDN YBWAXN. (дата обращения: 21.02.2024).
16. **Коваль, С.В.** Geomechanics — новинка в линейке программных продуктов АО «СИСОФТ РАЗРАБОТКА» / С.В. Коваль, Ф.Б. Киселев, А.А. Маляренко, Д.В. Жуковский, С.В. Девятков // CADmaster. — 2023. — № 1. — С. 62–70. — URL: https://www.cadmaster.ru/magazin/articles/cm_100_17.html. (дата обращения: 28.02.2024).
17. **Провора, Д.А.** Программные продукты для расчета мостов: преимущества и недостатки / Д.А. Провора // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ имени В.Г. Шухова: Материалы конференции, Белгород, 30 апреля — 20 мая 2021 года / Белгород: Белгородский государственный технологический университет имени В.Г. Шухова, 2021. — С. 2255–2261. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=46382402>. — EDN YTTSCC. (дата обращения: 29.02.2024).
18. **Соловьев, Л.Ю.** Современный вычислительный комплекс Sofistik в проектировании и оценке технического состояния искусственных сооружений / Л.Ю. Соловьев, Д.Н. Цветков // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. — 2012. — № 28. — С. 109–117. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21089722>. — EDN RTNEDN. (дата обращения: 29.02.2024).
19. **Райкова, Л.С.** Выбор автоматизированной системы для проектирования мостовых сооружений / Л.С. Райкова, М.Б. Акимов. — DOI <https://doi.org/10.17273/CADGIS.2015.2.12> // САПР и ГИС автомобильных дорог. — 2015. — № 2. — С. 78–85. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=24289811>. — EDN ULNWSZ. (дата обращения: 29.02.2024).
20. **Viqar, N.** Design of a Prestressed Concrete Bridge and Analysis by CSiBRIDGE / N. Viqar, M. Sameer // International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET). — 2019. — Т 6. — № 9. — С. 1093–1107. — URL: <https://www.irjet.net/archives/V6/i9/IRJET-V6I9165.pdf>. (дата обращения: 29.02.2024).

Сведения об авторах:

Нюхина Наталия Сергеевна — аспирант кафедры «Мосты и тоннели», ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта (МИИТ)», Москва, Россия, e-mail: natali.nns2001@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-4465-9379>

Мазур Евгений Витальевич — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Мосты и тоннели», ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта (МИИТ)», Москва, Россия,
e-mail: genha345@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5340-0863>
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1161926

Ибрагимова Ания Айратовна — аспирант, ФГБОУ ВО «Казанский государственный архитектурно-строительный университет», Казань, Россия, e-mail: anya13@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1875-8771>
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1172486
WoS: <https://www.webofscience.com/wos/author/rid/KAM-4675-2024>
SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=58700190000>
ResearchGate: <https://www.researchgate.net/scientific-contributions/Aniia-Ibragimova-2196665512>

Статья получена: 24.04.2024. Принята к публикации: 06.07.2024. Опубликовано онлайн: 20.07.2024.

REFERENCES

1. Segerlind L. Applied Finite Element Analysis. New York: John Wiley and Sons; 1976. Available at: <https://djvu.online/file/BfwAfdHENVPpn> (accessed 18th February 2024). (In Russ.).
2. Huebner K.H., Dewhirst D.L., Smith D.E., Byrom T.G. Huebner The Finite Element Method for Engineers. Wiley; 2001. Available at: https://www.google.ru/books/edition/The_Finite_Element_Method_for_Engineers/g6KSEAAAQBAJ?hl=ru&gbpv=0 (accessed 18th February 2024). (In Eng.).
3. Fedorova N.N., Val'ger S.A., Danilov M.N., Zakharova Yu.V. [ANSYS 17 Basics]. Moscow: DMK; 2017. Available at: <https://search.rsl.ru/ru/record/02000023857> (accessed 18th February 2024). (In Russ.).
4. Mansurova A.R. [Application of the ANSYS software package in computer modeling]. [Young scientist]. 2018;(39): 31–33. Available at: <https://moluch.ru/archive/225/52800/> (accessed 18th February 2024). (In Russ.).
5. Stolarski T., Nakasone Y., Yoshimoto S. Engineering Analysis with ANSYS Software. Elsevier Science; 2018. Available at: <https://books.google.ru/books?id=50IyDwAAQBAJ> (accessed 18th February 2024). (In Eng.).
6. Devyatov S.V. [Computer technology engineering analysis in the new millennium]. *CADmaster*. 2002;(5): 2–10. Available at: https://www.cadmaster.ru/magazin/articles/cm_15_msc_software.html (accessed 18th February 2024). (In Russ.).
7. Matveenkov N.V., Shalobyta N.N., Malinovsky V.N. About possibility of use of the program complex MSC.Nastran for the analysis strain-stress condition of reinforced concrete elements. *Vestnik of Brest State Technical University. Series: Construction and Architecture*. 2014;(1): 80–82. Available at: <https://rep.bstu.by/handle/data/2258> (accessed 18th February 2024). (In Russ., abstract in Eng.).
8. Turner T.L., Patel H.D. Analysis of SMA Hybrid Composite Structures in MSC.Nastran and ABAQUS. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 2007;18(5): 435–447. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1177/1045389X06066699> (accessed 18th February 2024).
9. Devyatov S.V. [Programs of the COSMOS family — a universal tool for finite element analysis]. *CADmaster*. 2002;(1): 17–23. Available at: https://www.cadmaster.ru/magazin/articles/cm_11_cosmos.html (accessed 18th February 2024). (In Russ.).
10. Szabó F.J. Comparison of Programming Ansys and COSMOS/M Finite Element Systems. *Design of Machines and Structures*. 2022;12(2): 110–119. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.32972/dms.2022.020> (accessed 18th February 2024).
11. Nesterov V.A., Sukhanov A.S. Vibration Analysis of Composite Rods by COSMOS/M Program. [Reshetnev readings]. 2015;1: 120–122. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25004376> (accessed 18th February 2024). (In Russ., abstract in Eng.).
12. Ryzhkov S. [ABAQUS — a multi-purpose finite element complex for engineering analysis]. [CAD and graphics]. 2003;(1). Available at: <https://sapr.ru/article/6736> (accessed 18th February 2024). (In Russ.).
13. Rao S.S. The Finite Element Method in Engineering. Elsevier Science; 2017. Available at: <https://books.google.ru/books?id=XN0kDwAAQBAJ> (accessed 18th February 2024). (In Eng.).
14. Semenov V.A. Software System of Strength Prediction for Micro Construction: Development Experience, Elaboration Experience, Introduction into Practice of Project Engineering and Specialists Retraining. *Open Education*. 2012;(6): 88–96. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=18411295> (accessed 21st February 2024). (In Russ., abstract in Eng.).
15. Khokhlov A.A. [Computer-aided design system SCAD Office]. In: [NEW INFORMATION TECHNOLOGIES in SCIENCE: collection of articles based on the results of the International Scientific and Practical Conference, Chelyabinsk, December 29, 2017. Volume Part 3]. Chelyabinsk: Agentstvo mezhdunarodnykh issledovaniy; 2017. p. 152–154. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=31777476> (accessed 21st February 2024). (In Russ.).
16. Koval' S.V., Kiselev F.B., Malyarenko A.A., Zhukovskiy D.V., Devyatov S.V. [Geomechanics is a new product in the line of software products of SYSOFT DEVELOPMENT JSC]. *CADmaster*. 2023;(1): 62–70. Available at: https://www.cadmaster.ru/magazin/articles/cm_100_17.html (accessed 28th February 2024). (In Russ.).

17. Provora D.A. [Software products for bridge calculations: advantages and disadvantages]. In: [*International scientific and technical conference of young scientists of BSTU named after. V.G. Shukhova: Conference materials, Belgorod, April 30 — 20 May, 2021*]. Belgorod: Belgorod State Technological University named after. V.G. Shukhova; 2021. p. 2255–2261. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=46382402> (accessed 29th February 2024). (In Russ.).
18. Soloviov L.Y., Tsvetkov D.N. Sofistik Software in Design and Technical State Assessment of Railway Engineering Structures. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2012;(28): 109–117. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21089722> (accessed 29th February 2024). (In Russ., abstract in Eng.).
19. Raikova L.S., Akimov M.B. The review of CAD systems for bridge design. *CAD & GIS for roads*. 2015;(2): 78–85. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.17273/CADGIS.2015.2.12>. (accessed 29th February 2024).
20. Viqar N., Sameer M. Design of a Prestressed Concrete Bridge and Analysis by CSiBRIDGE. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*. 2019;6(9): 1093–1107. Available at: <https://www.irjet.net/archives/V6/i9/IRJET-V6I9165.pdf> (accessed 29th February 2024). (In Eng.).

Information about the authors:

Natalia S. Nyukhina — Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia, e-mail: natali.nns2001@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-4465-9379>

Evgeny V. Mazur — Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia, e-mail: genha345@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5340-0863>
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1161926

Aniia A. Ibragimova — Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russia,
e-mail: anyia13@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1875-8771>
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1172486
WoS: <https://www.webofscience.com/wos/author/rid/KAM-4675-2024>
SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=58700190000>
ResearchGate: <https://www.researchgate.net/scientific-contributions/Aniia-Ibragimova-2196665512>

Submitted: 24th April 2024. Revised: 6th July 2024. Published online: 20th July 2024.