



Применение комплекса SOFiSTiK для анализа несущих конструкций Дворцового моста в Санкт-Петербурге

Дмитрий Ярошутин, Владимир Быстров

Современные требования к процессу обучения заставляют отказаться от традиционных методов. Знание теоретического материала без практической проверки численным экспериментом неэффективно. Осознание происходящих в конструкциях физических процессов и влияния на них внешних воздействий, наглядное представление деформированного состояния элементов конструкции и характера колебаний при динамической нагрузке позволяет выработать у будущего инженера навыки оценки конструктивных решений.

Причины разобщенности теоретических знаний и практических навыков инженера разнообразны, но одна из них известна всем — недостаток финансовых возможностей вузов для приобретения современных мощных и полнофункциональных программ анализа конструкций. Ведь зачастую вузы вынуждены использовать ограниченные учебные версии программ. Но реальные задачи инженера включают сегодня физическую и геометрическую нелинейность материала, динамические воздействия, геотехнические расчеты, учет предварительного напряжения конструкций. В то же время интеллектуальный уро-

вень современного студента и его готовность к самым передовым компьютерным методам расчета конструкций не вызывают никаких сомнений.

Подготовка специалистов для решения проблем современного мостостроения предполагает активное использование компьютерных систем анализа конструкций методом конечных элементов. Программы САПР заняли достойное место в учебном процессе современного вуза. Поэтому изучение общих основ мостостроения в нашем учебном заведении предусматривает применение передовых программных комплексов CAE. Большую помощь в оснащении передовыми программными средствами нам оказала компания ПСС (www.pss.srb.ru), которая в рамках специальной акции «Инновационный прорыв — инженеры будущего» безвозмездно предоставила СПб ГАСУ лицензионный программный комплекс анализа методом конечных элементов SOFiSTiK для обучения студентов и научно-исследовательской работы.

Программный комплекс МКЭ SOFiSTiK разработан специалистами Германии и широко применяется в проектных бюро многих стран

мира для проектирования мостов, тоннелей, высотных зданий и подземных сооружений.

Сегодня в СПбГАСУ на базе продуктов SOFiSTiK организован учебный класс на 30 рабочих мест (сетевая лицензия), элементы SOFiSTiK включены в учебные программы, используются в курсовом и дипломном проектировании. Решение учебных и научно-исследовательских задач, а также углубленное изучение возможностей SOFiSTiK осуществляется при участии как преподавателей кафедры мостов и тоннелей, так и компании ПСС и службы технической поддержки SOFiSTiK.

Сотрудниками кафедры мостов и тоннелей Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета по заданию эксплуатирующей организации — СПб ГУП «Мостотрест» — были выполнены работы по исследованию фактической динамической нагруженности и определению остаточного ресурса несущих конструкций разводных пролетных строений (ПС) Дворцового моста через Большую Неву в Санкт-Петербурге (рис. 1) по методике, разработанной профессором В.А.Быстровым.

Владимир Бастров

Заведующий кафедрой мостов и тоннелей СПбГАСУ. Канд. техн. наук, профессор, академик МАН, эксперт ГУ РИНКЦЭ по транспортным сооружениям.



Дмитрий Ярошутин

Ассистент кафедры мостов и тоннелей СПбГАСУ. С 2007 года — эксперт по SOFiSTiK (статические и динамические расчеты мостовых конструкций).



Проведенные исследования основывались на всестороннем изучении особенностей работы, физико-механических характеристик материалов конструкции, а также фактических эксплуатационных режимов (спектров напряжений) динамической нагруженности элементов при воздействии проходящих временных нагрузок, оказывающих сложное динамическое воздействие на элементы моста.

Конструкции двукрылых разводных ПС с шарнирным подвешиванием противовеса (системы Штрауса) включают восемь стальных сквозных ферм. Уравновешивание

НОВОСТИ

Компания ПСС — премьер-партнер Autodesk (Premier Solutions Provider)

Компания ПСС, ведущий системный интегратор решений Autodesk, получила статус премьер-партнера решений САПР в области архитектуры и строительства PSP Architecture, объектов инфраструктуры и землеустройства PSP Civil и машиностроения и приборостроения PSP Manufacturing. Это достижение — результат многолетней активной и профессиональной работы по внедрению специализированных 3D-решений Autodesk в проектных и конструкторских организациях.

Премьер-партнер Autodesk (сокр. PSP) — новое определение для реселлеров Autodesk, которое вводится в 2009 году. Премьер-партнер — это авторизованный реселлер, который имеет выдающиеся успехи в том или ином отраслевом направлении САПР и выделяет необходимое количество ресурсов для полноценного внедрения САПР в проектную практику своих заказчиков. Премьер-партнер должен соответствовать самым высоким критериям Autodesk, среди которых:

- готовность обеспечить мировой уровень консалтинга в сфере САПР и ИТ;
- высокая профессиональная квалификация персонала;
- наличие действующего авторизованного учебного центра Autodesk;
- способность внедрять решения Autodesk (а не только поставлять их).

Autodesk планирует обеспечить премьер-партнеров при реализации крупных проектов САПР прямой технической поддержкой от специалистов ведущих мировых офисов глобальной компании, а также необходимыми тренингами и методиками по специальным темам.

Иными словами, премьер-партнеры — это своеобразная элита партнерского сообщества Autodesk, имеющая обученный персонал, многолетний опыт комплексных внедрений разнообразных САПР предприятий и возможность выполнения пусконаладочных работ в любом городе.



Рис. 1. Стационарные и разводные пролетные строения Дворцового моста вид с Адмиралтейской набережной (фото 25.07.2008)

крыльев пролетных строений в процессе разводки осуществляется посредством противовесов, утяжеленных чугунными отливками и подвешенных к хвостовым частям ферм.

Анализ статической и динамической пространственной работы разводных пролетных строений и их элементов, с учетом накопленных за значительный период эксплуатации (с 1916 года) моста дефектов и повреждений, предшествовал натурным испытаниям пролетных строений с применением системы тензометрического контроля (СТКМ-ИС).

В качестве инструмента для изучения напряженно-деформированного состояния элементов разводного пролетного строения был выбран комплекс прикладных программ конечно-элементного анализа строитель-

ных конструкций SOFISTIK, ориентированный на расчет сложных, в том числе мостовых, сооружений и обладающий сертификатом соответствия требованиям отечественных норм проектирования (включая СНиП 2.05.03-84* «Мосты и трубы») — рис. 2.

Сложность расчета подобной конструкции заключалась в необходимости учета изменений статической схемы разводного ПС, которые возникают при замыкании двух крыльев ПС в трехшарнирную арочную конструкцию и дальнейшей подклинке противовеса, создающей дополнительный распор.

Для создания пространственной расчетной модели конструкции использовался графический препроцессор SOFIPLUS-X, основанный на OEM-версии популярного графического пакета AutoCAD (рис. 3). Трехмерный каркас был постро-

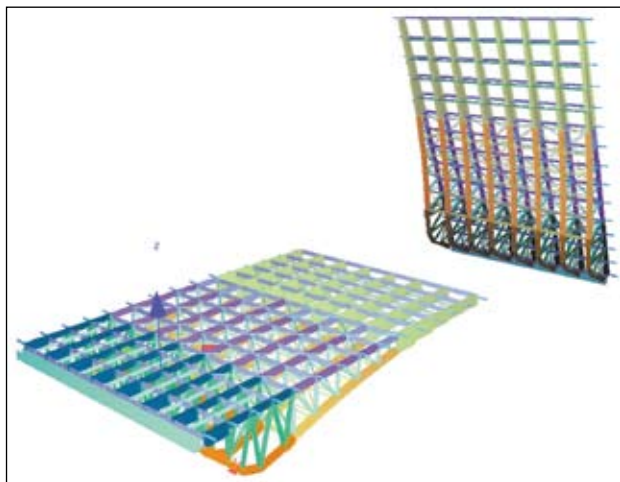


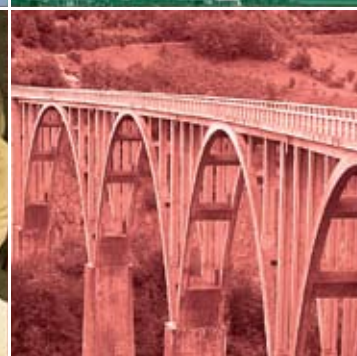
Рис. 2. Конечно-элементная модель разводного пролетного строения (без элементов продольного настила) с делением элементов на группы (визуализация элементов в модуле Animator, правое крыло раскрыто на угол 67°)

Autodesk®
Authorized Developer



Autodesk®
Authorized Training Centre

ПСС



Комплексная автоматизация управления и проектирования промышленных предприятий и проектных организаций

- Консалтинг в сфере ИТ проектирования и управления
- Программное обеспечение CAD / CAE / PDM
- Электронный архив и документооборот
- Обучение пользователей CAD / PDM
- Внедрение и сопровождение

НАШИ РЕШЕНИЯ – ВАШ УСПЕХ!

Санкт-Петербург

Тел. (812) 622-1014, 764-3831, 572-3698
cad@pss.spb.ru

Новосибирск

Тел. (383) 308-1577, 299-9757
nsk@pss.spb.ru

Тула

Тел. (4872) 25-21-19
tula@pss.spb.ru

Краснодар

Тел. (861) 279-09-14
ug@pss.spb.ru



SOFiStiK

Интегрированный программный комплекс конечно-элементного анализа строительных конструкций и проектирования в среде AutoCAD



Пакеты программ имеют адаптации для специальных задач:

- расчет мостов, в том числе вантовых, с учетом стадий возведения;
- расчет многоэтажных зданий;
- расчет подземных сооружений и решение геотехнических задач, анализ полупространства грунта с учетом физической нелинейности;
- расчет большепролетных оболочек.

Пакеты SOFiStiK управляются комплексом SOFiStiK Structural Desktop (SSD). SSD предоставляет пользователям ориентированный на задачу способ работы, предлагая различные процедуры или определенную задачу из библиотеки. Ввод исходных данных возможен путем моделирования в среде AutoCAD, чтения моделей Autodesk Revit Structure или через табличный редактор. Имеются мощные средства анализа результатов в постпроцессорах:

- проектирование зданий — различные программные модули анализа видов конструкций методом конечных элементов на статические и динамические нагрузки и сочетания, основанные на базовом солвере ASE;
- для проектирования тоннелей — модуль WinTUBE, представляющий собой 3D-препроцессор, образование 3D-моделей путем выдавливания плоскостей из любой 2D-модели, генератор для 3D-сеток с четырехгранными элементами, выравнивание тубинговой крепи, стадии выемки грунта, история нагружения, материал/модели грунта, нелинейная модель бетона, нелинейные пружины, анализ утечки, взаимодействие конструкций и грунта;
- стальные конструкции — модули SOFiStiK ASE, STAR и DYNA предлагают мощные инструменты для анализа и проектирования сложных пространственных стальных конструкций. Возможно применение нелинейных материалов расчетной модели;
- проектирование мостов — комплексная технология анализа и проектирования мостовых конструкций, преднапряженные железобетонные и стальные, а также композитные мосты, все конструктивные системы, включая коробочные фермы, Т-образные балки, арочные мосты, вантовые мосты, моделирование всех методов монтажа, включая пролет за пролетом, сбалансированные консоли и др.;
- динамика — DYNA, представляющий собой автономный инструмент для линейной динамики и сейсмического анализа и проектирования. ASE предлагает метод пошагового интегрирования по времени и определение собственных значений колебаний;
- гидрогазодинамика (CFD) — программа для анализа сложных физических явлений, включая моделирование аэродинамического воздействия ветра на высотные здания и мосты.

Программный комплекс SOFiStiK имеет сертификат соответствия нормам проектирования СНиП Российской Федерации.

Официальный дистрибьютор ПК SOFiStiK на территории СНГ — компания ПСС (www.pss.sp b.ru).

ен с применением примитивов AutoCAD, которые впоследствии послужили основой для создания структурных (геометрических) объектов SOFiStiK (структурные области — GAR, линии — GLN и точки — GPT), образующих структурную (геометрическую) модель (рис. 4). Дальнейшая разбивка структурных объектов на конечные элементы осуществлялась в модуле SOFiMSHB в автоматическом режиме с передачей параметров конечно-элементной и геометрической моделей в единую базу

данных проекта. Готовая конечно-элементная модель подвергалась предварительному анализу с целью исключения возможных ошибок и неточностей.

Расчет на действие нормативных значений постоянных (включая собственный вес, определяемый в автоматическом режиме) и временных групп нагрузок был осуществлен в универсальном расчетном модуле ASE с дальнейшим учетом коэффициентов надежности, определением правил для вычисления расчетных сочетаний

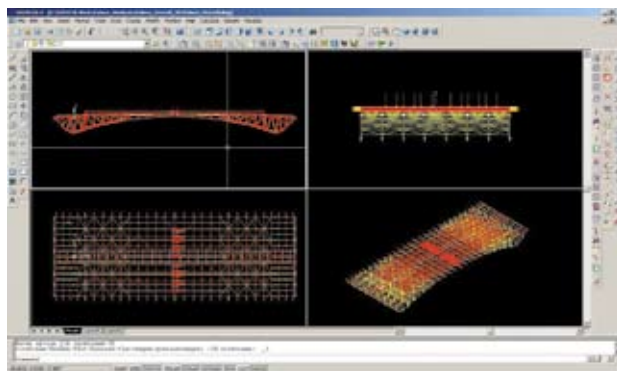


Рис. 3. Структурная модель разводных пролетных строений, построенная средствами препроцессора SOFiPLUS-X 16.4

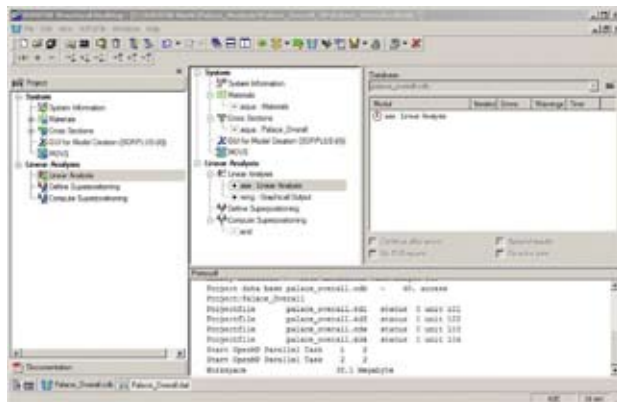


Рис. 4. Структура проекта SOFiStiK (расчет осуществлялся под управлением единой оболочки — SOFiStiK Structural Desktop)

усилий и расчетом огибающих в модуле MAXIMA (рис. 5-7).

По полученным значениям расчетных усилий в элементах, в том числе и от расчетных подвижных нагрузок — АК и НК по СНиП 2.05.03-84*, выбранными в качестве эталонных, была произведена классификация элементов по грузоподъемности, позволившая подтвердить предположение о том, что наиболее нагруженными (и определяющими остаточный ресурс пролетных строений) в процессе эксплуатации оказываются балки поперечного настила в хвостовой части и над осью вращения разводного пролетного строения моста.

Детальный анализ напряженно-деформированного состояния элементов конструкций с учетом воздействия имеющегося коррозионного ослабления сечений проводился для отдельных элементов, в частности для наиболее нагруженной фермы Ф-3, а также для элементов продольного и поперечного настила и узлов прикрепления. При этом контуры и сечения основных

несущих элементов, фасонки и узлов объединения элементов фермы, заданные структурными областями, разбивались на конечные элементы пластин-оболочек. Участки стенок элементов, подверженные сплошной и очаговой коррозии, были смоделированы при помощи структурных элементов, имеющих меньшую толщину.

Для элементов настила мостового полотна (продольные и поперечные балки), определяющих остаточный ресурс конструкции пролетного строения, наиболее существенными являются вопросы оценки фактических спектров напряжений σ , характеризующихся, как правило, нестационарными режимами со значительным, превышающим нормативную ($2 \cdot 10^6$ циклов) базу количеством циклов перемены амплитуд напряжений при действии нагрузок, иногда близких к резонансным.

Расчетно-теоретическая оценка динамической реакции элементов мостового полотна на воздействие движущейся с заданной скоростью автомобильной нагрузки (тележка

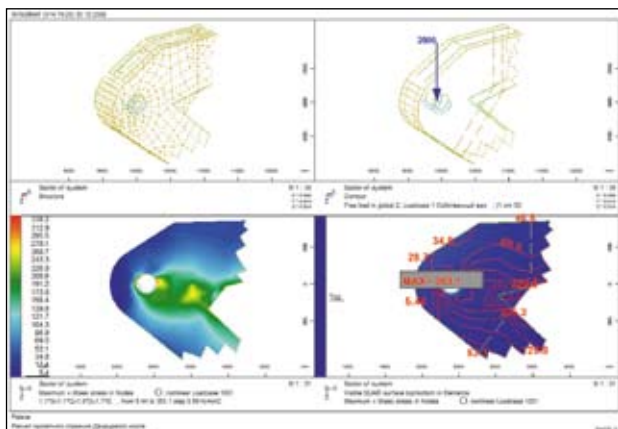


Рис. 5. Фрагмент расчетной схемы, нагрузка на узел, эквивалентные ($\sigma_{экв}$) напряжения (МПа) в элементах вертикальной стенки узла крепления противовеса (постпроцессор WinGRAF)

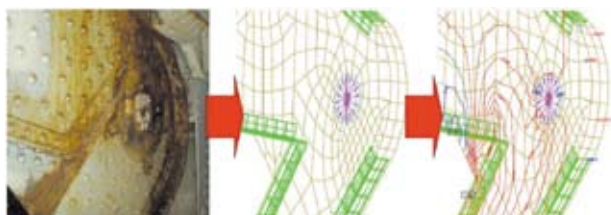


Рис. 6. Состояние узла крепления противовеса, его конечно-элементная модель (фрагмент стенки) и диаграмма эквивалентных напряжений в пластинах расчетной схемы

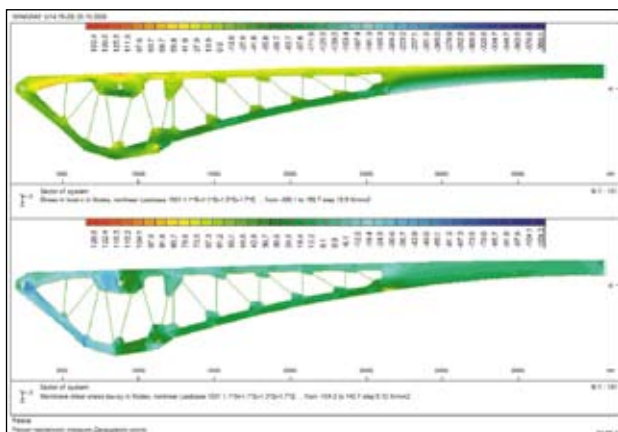


Рис. 7. Нормальные (σ) и касательные (σ_{xy}) напряжения (МПа) в элементах фермы Ф-3 при совместном действии постоянных (собственный вес, проезжая часть, вес противовеса) и временной подвижной нагрузок

А11), представляющее собой сложный, нелинейный во времени процесс, осуществлялась с использованием нелинейных возможностей модуля ASE методом пошаговых итераций (Time Step Analysis). Для решения указанной задачи на языке CADINP был написан макрос, описывающий движение нагрузки с заданной скоростью и отвечающий за построение нелинейного итерационного процесса (расчет на последовательных временных

интервалах). Анализ полученных результатов (построение осциллограмм колебаний) осуществлялся в модуле DYNR и постпроцессоре DBView (рис. 8).

Результаты, полученные в ходе динамического анализа, позволили еще на этапе расчетно-теоретических исследований дать оценку основных динамических характеристик (величину динамического коэффициента, амплитуды колебаний напряжений, величину

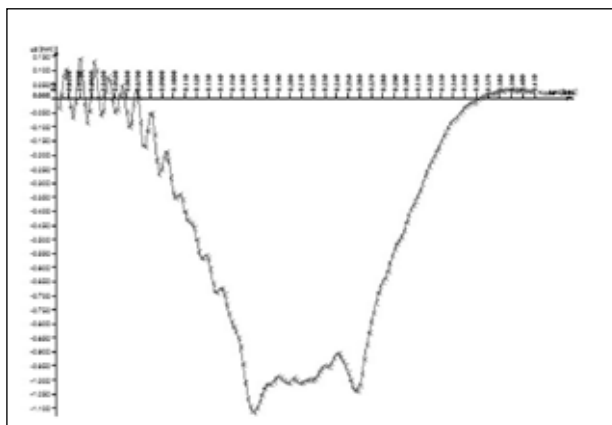


Рис. 8. Фрагмент расчетной осциллограммы амплитуд вертикальных перемещений элемента настила — продольной балки (фрагмент) при проезде автомобильной нагрузки, — полученный в ходе нелинейного динамического расчета элементов мостового полотна

коэффициента асимметрии), что в дальнейшем с достаточной степенью точности было подтверждено результатами экспериментальных исследований.

Необходимо отметить, что программный комплекс SOFiStiK в рамках действующего Соглашения о некоммерческом партнерстве с ПСС был безвозмездно передан СПбГАСУ для обучения студентов и научно-исследовательской работы компанией ПСС — официальным дистрибьютором SOFiStiK на территории СНГ. Компания ПСС при участии специалистов SOFiStiK AG провела в Санкт-Петербурге обучение преподавателей и аспирантов СПбГАСУ, позволившее ускорить процесс освоения наукоемкого европейского программного продукта.

Широкий спектр возможностей моделирования конструкций и нагрузок, современный графический интерфейс, адаптированный под строительные задачи, возможность параметризации расчетов, большое количество специализированных модулей, внешние интерфейсы (Revit, Femap, IFC, Fides и др.), уникальный опыт применения решений SOFiStiK ведущими европейскими проектировщиками, а также прошедшая сертификация на соответствие российским нормам позволяют выделить SOFiStiK как пример удачного сочетания достоинств известных hi-end-пакетов — лидеров среди программ МКЭ с адаптацией для строительных задач и полной локализацией для применения на территории России и стран СНГ. ➤