
МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

УДК [624.27:625.1:624.042.8]

В. АРТЕМОВ^{1*}, Ф. ВЕНЬКО^{2*}

^{1*} Исследовательская лаборатория «Dynamics & Structures, Lab.», Днепропетровск, Украина, тел. +38 (050) 457 68 19, эл. почта v.artomov@gmail.com

^{2*} «Ленгипротранспуть» – филиал ОАО «Росжелдорпроект», Санкт-Петербург, Российская Федерация, тел. (812) 457 81 31, эл. почта venkofm@rzdpr.ru

МОСТЫ НА ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ МАГИСТРАЛЯХ: ВЫЗОВЫ ДЛЯ ИНЖЕНЕРОВ СНГ

Цель. Национальная нормативная база СНГ не содержит набора правил, достаточного для проектирования скоростных железнодорожных магистралей и сопутствующей инфраструктуры. Например, в базовом нормативном документе СНиП «Мосты и трубы» нет понятия «выделенная пассажирская магистраль», не учитывается скорость движения поездов, а различные динамические эффекты учитываются эмпирическими коэффициентами. **Методика.** Основными особенностями системы высшего технического образования в СНГ являются «типизация» курсовых проектов и работ, шаблонный процесс обучения, невозможность выбора и смены дисциплин, кафедр, преподавателей. Серьезным вызовом для студента выступает также постоянное уменьшение количества аудиторных занятий, с явным смещением акцентов в сторону самообразования. В то же время, современная инженерия существенно компьютеризирована, благодаря активному применению различных систем автоматизированного проектирования. **Результаты.** Рекомендации для проектировщиков мостов на ВСМ: в большинстве случаев достаточно ограничиться стержневыми конечными элементами; гармонический анализ даст возможность выявить «слабые» места конструкции, определить периоды и частоты свободных колебаний. Динамический расчет во времени позволит проанализировать напряженно-деформированное состояние моста при движении поезда с заданной скоростью, вычислить скорости, перемещения, ускорения. **Научная новизна и практическая значимость.** Сегодня в СНГ появляются первые частные научно-исследовательские центры. Например, украинская исследовательская лаборатория «Dynamics & Structures, Lab.» (www.dystlab.com) была создана с целью изучения и решения вопросов динамики строительных конструкций, зданий и сооружений, а также смежных задач механики деформируемых систем. **Выводы.** В лаборатории «Dynamics & Structures, Lab.» занимаются разработкой специализированного программного обеспечения – среды параметрического моделирования и инженерного анализа – Belinda Structure. В программе реализован метод конечных элементов, а моделирование ведется с использованием скриптовой технологии. Интерфейсная часть программы содержит развитые средства трехмерной визуализации.

Ключевые слова: железнодорожный мост; высокоскоростная железнодорожная магистраль; поезд; Еврокоды; национальные стандарты; СНГ; СНиП; Belinda Structure

Введение

Идеи создания рельсового транспорта, способного конкурировать по скорости с гоночными автомобилями, зародились еще в середине XX века. Однако быстро удовлетворить потребности пассажиров в скорости перемещения тогда было невозможно – техническая база подвижного состава этого не предполагала. Достаточно долго «отставали» также и другие составляющие транспортной инфраструктуры – искусственные сооружения, путь, средства электрификации и др. Впрочем, конкретные

технические решения долго не удавалось вывести из опытных лабораторий на промышленный уровень производства также в силу малой изученности вопроса, отсутствия эффективных методов проектирования и анализа.

Как показало время, в XXI веке скоростные и высокоскоростные магистрали (ВСМ) имеют страны с высоким уровнем ВВП и общей позитивной динамикой роста экономики (США, Япония, Канада, Англия, Франция и др.). Страны СНГ в этом плане существенно отстают: скорость движения пассажирских поездов чуть более 140 км/ч здесь считается достаточно вы-

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

сокой, хотя в мировой практике проектирования железных дорог скорость до 160 км/ч соответствует обычным пассажирским перевозкам.

Каким образом развитым странам удаётся сегодня успешно проектировать, строить и эксплуатировать ВСМ?

Цель

Опыт европейских стран показывает, что успех реализации ВСМ зависит не только от объемов финансирования, но и от состояния нормативной базы. Так, постепенный переход на единую систему межнациональных европейских стандартов (Еврокод) даёт возможность использовать в проектировании наиболее прогрессивные и современные научно-технические решения, а также организовать единый стандартизованный подход к подготовке и аттестации кадров для работы в транспортной отрасли [1, 2].

Следует отметить, что, несмотря на активное изучение Еврокодов, в СНГ пока преобладает национальная нормативная база [3-5], которая не содержит достаточного для проектирования ВСМ и сопутствующей инфраструктуры набора правил. Например, в базовом для стран СНГ нормативном документе по проектированию мостов [3] нет понятия «выделенная пассажирская магистраль», не учитывается скорость движения поездов, а различные динамические эффекты учитываются эмпирическими коэффициентами. Для сравнения, проектировщику мостов на ВСМ Еврокоды предписывают проводить динамические расчеты – как гармонический, так и расчет во временной области; при этом следует в совершенстве владеть и оперировать такими понятиями, как скорость движения, ускорение, период, частота, амплитуда, пространственные колебания, демпфирование и пр.

Учитывая специфику подготовки отечественных инженеров-проектировщиков, это влечет за собой определенные трудности. Выражаясь проще, отечественного инженера можно заставить прочитать Еврокод, но нельзя его быстро научить мыслить категориями Еврокодов. Методологически европейские нормы существенно отличаются от норм СССР и СНГ, потому что не являются готовыми «методическими указаниями» как, например, многие СНиПы.

Возможно, что первые проекты высокоскоростных железнодорожных магистралей в СНГ потребуют разработки новых, уникальных нормативных документов, отражающих специфику конкретного региона страны или участка движения. Как известно, уже сегодня активно обсуждаются пути реализации проектов ВСМ «Москва – Санкт-Петербург», «Москва – Казань» и др. Безусловно, что эти и другие проекты должны максимально использовать мировой опыт, заимствовать лучшие образцы научно-технических решений, опираться на лучшие технические стандарты, нормативные документы, инженерное программное обеспечение.

Методика

В рамках изучения проблематики ВСМ отдельно следует остановиться на вопросах подготовки и повышения квалификации кадров.

На сегодняшний день в высшем техническом образовании применяется достаточно консервативная система подготовки специалистов, в основу которой положены наработки СССР. Основными особенностями этой системы являются, например, «типизация» курсовых проектов и работ, шаблонный процесс обучения, невозможность выбора и смены дисциплин (кафедр, преподавателей) и т. п. Серьезным вызовом (в первую очередь, для самого студента) выступает также постоянное уменьшение количества аудиторных занятий, с явным смещением акцентов в сторону самообразования.

В то же время, современная инженерия существенно компьютеризирована, благодаря активному применению различных систем автоматизированного проектирования (САПР). В подготовке профессиональных кадров эти обстоятельства порождают следующие серьезные проблемы:

- вместо изучения методов расчета студенты учат интерфейсы (кнопки и меню) программ;

- наличие «хорошей» САПР на рабочем месте считается более важным, нежели понимание фундаментальных принципов работы сооружения;

- молодой специалист становится «заложником» программы, считая её результат априори достоверным;

- поддаваясь на уговоры менеджеров-рекламщиков, продающих САПР, инженер

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

стремится максимально использовать все её возможности: тысячи учтённых степеней свободы, автоматизация вычисления характеристик, библиотеки сечений и материалов, всевозможные виды анализа и многое другое.

Этот (далеко не полный!) список таит в себе много опасностей. Например, отсутствие достаточных знаний о принципах формирования расчетной схемы сооружения неминуемо приведет к серьёзным ошибкам, вне зависимости от того, на какое количество узлов и конечных элементов разделена модель. И чем больше будет модель, тем сложнее будет выявить её ошибки.

Авторы [6] в своих научных работах неоднократно обращают внимание на необходимость пересмотреть устоявшиеся подходы к техническому образованию. Да, изучать расчётные программы необходимо – но не с позиции заучивания элементов пользовательского интерфейса, а с позиции тестирования, выявления слабых и сильных сторон, изучения возможностей и пр. Ко всему этому следует подходить крайне осторожно, взвешенно, критически. Автор данной статьи видит весьма пагубной привычку молодых специалистов рассчитывать модели конструкций со многими сотнями и даже тысячами степеней свободы, не имея при этом достаточного опыта расчета простейших систем.

Результаты

В данном контексте, можно сформулировать несколько важных рекомендаций для проектировщиков мостовых конструкций на ВСМ:

1) мост – линейно протяженная конструкция, поэтому в абсолютном большинстве случаев можно ограничиться стержневыми (балочными) конечными элементами;

2) стараться работать с моделями с небольшим числом степеней свободы (одномассовая система является эталоном простоты и надёжности!);

3) гармонический анализ – ваш «друг» № 1: он даст возможность выявить «слабые» места конструкции, определить периоды и частоты свободных колебаний;

4) динамический расчет во времени – ваш «друг» № 2: с его помощью вы пропустите по мосту подвижной состав на заданной скорости, на каждом шаге симуляции проанализируете

напряженно-деформированное состояние моста, вычислите скорости, перемещения, ускорения;

5) не быть жертвой рекламы: отдавать предпочтение расчётным программам, которые решают конкретно вашу задачу, а не тем, которые имеют Сертификаты соответствия или высокую стоимость;

6) помнить, что в любом случае вся ответственность за проектные решения лежит на вас (да, это написано в том самом Лицензионном соглашении, с которым вы соглашаетесь при установке программы!).

Научная новизна и практическая значимость

Одной из главных проблем, сдерживающих научное развитие отечественных академий и университетов, является их существенная зависимость от государственного финансирования. Между тем, наиболее успешные научно-образовательные заведения США и Европы имеют право самостоятельно распоряжаться собственными доходами и распределять внутренние финансовые потоки. При этом речь идёт не только о приобретении дорогостоящего лабораторного оборудования, но и о повышении (до уровня мировых!) зарплат научно-педагогических работников.

Для сравнения, средняя зарплата доцента украинского ВУЗа в середине 2014 года составляла 250...300 \$, а аналогичный показатель в США – 2500...3000 \$. По мнению многих исследователей, такая катастрофическая ситуация с финансированием может «отбросить» отечественную науку назад на десятилетия [7].

Именно поэтому сегодня в СНГ появляются первые частные научно-исследовательские центры. Так, украинская исследовательская лаборатория «Dynamics & Structures, Lab.» создавалась с целью изучения и решения вопросов динамики строительных конструкций, зданий и сооружений, а также смежных задач механики деформируемых систем.

В лаборатории сегодня развивают идеи, начало которым было положено на кафедре мостов Днепропетровского института инженеров транспорта (сейчас – ДНУЖТ имени академика В. Лазаряна, Украина), под руководством академика Н. Г. Бондаря в 70-80-х гг. прошлого века. Отличительными особенностями таких

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

задач являются учёт скорости движения транспорта при движении по искусственным сооружениям, неровности траектории пути, физические и геометрические нелинейности, сложное демпфирование и др.

Идея создания специализированного научного центра для исследования задач динамики сооружений была выдвинута в 2011 году, а уже в конце 2012 г. была запущена первая версия сайта лаборатории в сети Интернет [8].

На данный момент, лаборатория «Dynamics & Structures, Lab.» представляет собой сообщество учёных и инженеров из разных уголков планеты, которым интересна механика строительных конструкций, проектирование, оптимизация, компьютерное моделирование и многие другие технические аспекты. Участники сообщества обмениваются профессиональными контактами, делятся опытом, организуют тематические мероприятия и встречи.

Помимо общего исследовательского направления, «Dynamics & Structures, Lab.» также занимается разработкой специализированного программного обеспечения. Флагманским программным продуктом лаборатории выступает среда параметрического моделирования и инженерного анализа – Belinda Structure [9].

С момента начала разработки (2005 г.), программа «Belinda Structure» претерпела множество изменений и усовершенствований, и развилась из небольшого приложения для расчета балочных мостов до полнофункциональной среды трехмерного моделирования. В программе реализован универсальный метод решения задач строительной механики – метод конечных элементов. Моделирование ведется с использованием скриптовой технологии, что существенно обогащает возможности анализа сложных параметрических моделей. Интерфейсная часть программы содержит развитые средства трехмерной визуализации.

Выводы

Не останавливаясь на достигнутом, специалисты лаборатории «Dynamics & Structures, Lab.» ищут новые пути для совершенствования своих разработок. Так, в середине 2014 г. они обратились к своим коллегам из компании АСКОН с предложением внедрить в среду «Belinda Structure» ядро геометрического моде-

лирования С3D, широко применяемое в линейке программных продуктов АСКОН (например, в САПР «КОМПАС-3D»). Партнёры надеются, что подобные инициативы дадут новый импульс в исследованиях динамики сооружений и улучшат качество программного обеспечения, которое применяется для проектирования искусственных сооружений на высокоскоростных железнодорожных магистралях [10].

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. European Standard. Eurocode 1: Actions on structures – Part 2, [Text]: Traffic Loads on bridges / European Committee for Standardization. – В-1050, Brussels, 2002. – 162 p.
2. Національний стандарт України ДСТУ-НБ EN 1991-2:2010. Єврокод 1. Дії на конструкції. Частина 2. Рухомі навантаження на мости (EN 1991-2:2003) [Текст]. – Надано чинності 2013-07-01. – Київ : Мінрегіонбуд України, 2003. – 217 с.
1. СНиП 2.05.03-84*. Мосты и трубы [Текст]. – Введ. 1986-01.01. – Москва : Госстрой России, 2001. – 214 с.
3. Свод правил СП 35.13330.2011 «Мосты и трубы. Актуализированная редакция СНиП 2.05.03-84*» [Текст]. – Москва : ОАО «ЦНИИС», 2011. – 340 с.
4. ДБН В.2.3-14:2006. Споруди транспорту. Мости та труби. Правила проектування [Текст]. – Чинні від 2007-02-01. – Київ : Мін. буд., архіт. та житл.-комун. госп-ва, 2006. – 359 с.
5. Кулябко, В. В. Модели статического и динамического взаимодействия сооружений с основаниями сложных типов (по включениям и свойствам) [Текст] / В. В. Кулябко, В. И. Кузьменко, Ю. Е. Власенко // Сб. «Пространственные конструкции зданий и сооружений (Исследования, расчет, проектирование и применение)», под ред. В. В. Шугаева и др. – ЦНИИСК: Вып. 12. – Москва : 2009. – С. 194-202.
6. Сообщество. Образование [Электронный ресурс] // Trust.UA. – Режим доступа: <http://hate.trust.ua/osvita/2014/01/08/76/Polovina-prepodavatelei-VUZov-Ukraini-poluchaet-zarplatu-menshe-3-tisyach-griven/>. – Загл. с экрана.
7. Официальный сайт виртуальной исследовательской лаборатории Dynamics & Structures, Lab. [Электронный ресурс] // Режим доступа: <http://www.dystlab.com>. – Загл. с экрана.
8. Среда параметрического моделирования и инженерного анализа Belinda Structure [Электронный ресурс] // Виртуальная иссл. лаб. Dynamics

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

& Structures, Lab. – Режим доступа:
<http://www.dystlab.com/index.php/belinda>. – Загл.
 с екрана.

Lab.» [Электронный ресурс] // Режим доступа:
<http://c3dlabs.com/ru/news/items/?news=1904> –
 Загл. с экрана.

9. Геометрическое ядро C3D станет основой раз-
 работок лаборатории «Dynamics & Structures,

В. АРТЬОМОВ^{1*}, Ф. ВЕНЬКО^{2*}

^{1*} Дослідницька лабораторія «Dynamics & Structures, Lab.», Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (050) 457 68 19,
 ел. пошта v.artomov@gmail.com

^{2*} «Ленгипротранспут» – філіал ВАТ «Росжелдорпроект», Санкт-Петербург, Російська Федерація, тел. (812) 457 81 31,
 ел. пошта venkofm@rzdpr.ru

МОСТИ НА ВИСОКОШВИДКІСНИХ ЗАЛІЗНИЧНИХ МАГІСТРАЛЯХ: ВИКЛИКИ ДЛЯ ІНЖЕНЕРІВ СНД

Мета. Національна нормативна база СНД не містить набору правил, достатнього для проектування швидкісних залізничних магістралей та відповідної інфраструктури. Наприклад, у базовому нормативному документі СНіП «Мости та труби» відсутнє поняття «окрема пасажирська магістраль», не враховується швидкість руху поїздів, а динамічні ефекти враховуються емпіричними коефіцієнтами. **Методика.** Основними особливостями системи вищої технічної освіти в СНД є «типізація» курсових проектів і робіт, шаблонний процес освіти, неможливість вибору та зміни дисциплін, кафедр, викладачів. Суттєвим викликом для студента є також постійне зменшення кількості аудиторних занять, зі зміщенням акцентів у бік самоосвіти. У той же час, сучасна інженерія суттєво комп'ютеризована, завдяки активному застосуванню різних систем автоматизованого проектування. **Результати.** Рекомендації для проектувальників мостів на ВШМ: у більшості випадків достатньо обмежитись стержневими скінченними елементами; гармонійний аналіз дасть можливість виявити «вузькі» місця конструкції, визначити періоди й частоти вільних коливань. Динамічний розрахунок у часі дозволить проаналізувати напружено-деформований стан моста під час руху поїзда із заданою швидкістю, визначити швидкості, переміщення, прискорення. **Наукова новизна та практична значимість.** Сьогодні в СНД з'являються перші приватні науково-дослідницькі центри. Наприклад, українська дослідницька лабораторія «Dynamics & Structures, Lab.» (www.dystlab.com) була створена з метою дослідження та вирішення питань динаміки будівельних конструкцій, будівель та споруд, а також суміжних задач механіки деформованих систем. **Висновки.** У лабораторії «Dynamics & Structures, Lab.» займаються розробкою спеціалізованого програмного забезпечення – середовища параметричного моделювання та інженерного аналізу – Belinda Structure. У програмі реалізовано метод скінченних елементів, а моделювання ведеться з застосуванням скриптової технології. Інтерфейсна частина програми містить розвинуті засоби тривимірної візуалізації.

Ключові слова: залізничний міст; високошвидкісна залізнична магістраль; поїзд; Єврокоди; національні стандарти; СНД; СНіП; Belinda Structure

V. ARTOMOV^{1*}, F. VENKO^{2*}

^{1*} Virtual research laboratory «Dynamics & Structures, Lab.», Dnipropetrovsk, Ukraine, tel. +38 (050) 457 68 19,
 e-mail v.artomov@gmail.com

^{2*} «Lengiprotransput» – branch of JSC «Roszheldorproject», St. Petersburg, Russian Federation, tel. (812) 457 81 31,
 e-mail venkofm@rzdpr.ru

HIGH-SPEED RAILWAY BRIDGES: CHALLENGES FOR ENGINEERS OF THE CIS

Purpose. National regulatory framework for the CIS does not contain a set of rules sufficient to design high-speed rail lines and related infrastructure. For example, the basic normative document SNiP «Bridges and pipes» there is no «dedicated passenger line» do not take into account the speed of trains, and a variety of dynamic effects are taken into account empirical coefficients. **Methodology.** The main features of the system of higher technical education in the CIS are «typing» of course projects and papers, template learning process, the inability to select and change disciplines, departments and teachers. A serious challenge for the student acts as a permanent reduction in

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

the number of classroom hours, with a clear shift towards self-education. At the same time, modern engineering essentially computerized, thanks to the active use of various computer-aided design. **Findings.** Recommendations for designers of high-speed railway bridges: in most cases sufficient to restrict rod finite elements; modal analysis will make it possible to identify «weak» construction sites, to determine the periods and frequency of free oscillations. Dynamic calculation of time will allow to analyze the stress-strain state of the bridge while driving a train at a predetermined rate, calculate the speed, handling, acceleration. **Originality.** Today in the CIS appear first private research centers. For example, the Ukrainian Research Laboratory «Dynamics & Structures, Lab.» (www.dystlab.com) was established to study and solve the problems of the dynamics of structures, buildings and structures, as well as related problems in the mechanics of deformable systems. **Practical value.** In the laboratory «Dynamics & Structures, Lab.» engaged in the development of specialized software – parametric modeling and engineering analysis environment Belinda Structure. Program based on the finite element method, and the simulation is carried out using scripting technologies. The interface of the program includes advanced tools for three-dimensional visualization.

Keywords: railway bridge; high-speed railway; train; EN; national standards; CIS; SNiP; Belinda Structure

Статья рекомендована к публикации д.т.н., проф. В. В. Кулябко (Украина), д.т.н., проф. В. Д. Петренко (Украина).

Поступила в редколлегию 20.09.2014.

Принята к печати 28.09.2014.