

В. В. КУЛЯБКО (ПГАСА, Днепропетровск)

НЕЛИНЕЙНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ КОНСТРУКЦИЙ МОСТОВ, ПУТИ, ИНФРАСТРУКТУРЫ – С ОСНОВАНИЕМ И ИНЕРЦИОННОЙ ДИСКРЕТНОЙ ПОДВИЖНОЙ НАГРУЗКОЙ ОБЩЕГО ВИДА: РАСЧЕТЫ, ИСПЫТАНИЯ, ГАШЕНИЕ КОЛЕБАНИЙ

У статті розглядаються питання поширення можливостей комп'ютерного моделювання задач динамічної взаємодії конструкцій мостів і їхньої інфраструктури із транспортом, що рухається, та потоками.

В статье рассматриваются вопросы расширения возможностей компьютерного моделирования задач о динамическом взаимодействии конструкций мостов и их инфраструктуры с движущимся транспортом и потоками.

In the article the issues of increasing the possibilities of computer modeling of the dynamic interaction of bridge constructions and their infrastructure with moving transport and flows are considered.

Введение - о корифеях Днепропетровской школы строительной и транспортной механики

На данной конференции, видимо, учитывая её посвящение нашим учителям, было бы весьма полезным для молодых слушателей начать с «истоков» – с истории развития, например, Днепропетровских Школ ДИНАМИКИ вагонов, мостов и пути «сверху вниз» (по порядку расположения этих трех объектов в движущейся транспортной системе), коснувшись «начал» – истории развития общей механики от Л. Эйлера – к «Екатеринославцу-Днепропетровцу» А. Н. Диннику. Затем – рассмотреть работы его учеников с «выходом» на задачи и успехи в указанной тематике последующих ученых города, включая все современные ответвления этих известных и признаваемых всегда в СССР и СНГ школ динамики. Здесь обнаружится непрерывная тематическая и «школьная» связь ученых университетов и академий: ДНУ, НГУ, НМетАУ, ДНУЖТ и ПГАСА (последним в 2010 г. исполняется по 80 лет!).

Но такая ёмкая конференция имела бы, возможно, другое название и научно-педагогическое и методико-историческое направление. Поэтому, предполагая неизбежное прикосновение каждого докладчика настоящей конференции к истории ДИИТа и упомянутых научных школ, начнем в данной статье обзор работ по заявленной теме с упоминания об известных работах как корифеев, создававших эти школы: В. А. Лазарян, Н. Г. Бондарь, М. Н. Гольдштейн (группы некоторых работ из этих школ соответственно выделены в библиографическом списке), так и их последователей (каким себя считает и автор статьи).

Фундаментальные исследования транспортной механики таких сложных динамических систем, как железнодорожные грузовые и пассажирские вагоны и поезда, проводились в школе В. А. Лазаряна, как правило, с практическими приложениями и внедрением [1–4]. Уже в 60-х годах в этой школе широко применялись различные типы ЭВМ, проводились широкомасштабные теоретические и экспериментальные исследования нелинейных колебаний экипажей с демпферами сухого трения для гашения продольных, вертикальных и горизонтальных колебаний подсистем. Подтверждением «весомости» школы было участие в написании машиностроительного справочника (шеститомника!) «Вибрации в технике» (том 3, глава «Колебания железнодорожного состава», тираж тома – немыслимый по теперешним временам – 30 тыс. экземпляров).

В работах В. Ф. Ушкалова (научного руководителя автора статьи по кандидатской диссертации [6]) также рассматривались проблемы взаимодействия сложных подсистем при случайных возмущениях [3, 4]. Одним из ярких примеров «продукта данной школы» является весьма популярная уже более 30 лет на транспортных магистралях СНГ серийная (выпущены десятки тысяч штук) платформа для перевозки большегрузных контейнеров [3–6].

Не менее известны и работы по мостостроению школы Н. Г. Бондаря [7, 8], его последователи – заведующие в разные годы кафедрой «Мосты» и широко известной Лаборатории динамики мостов – являлись авторами популярных трудов по аэродинамике, гашению и анализу колебаний [9–11]. Следует особо отметить теоретические разработки основателя школы, Н. Г. Бондаря, по весьма сложным и фундаментальным задачам нелинейной теории колеба-

ний [7]. Работы З. Г. Ройтбурда, В. П. Тарасенко и Г. Н. Яковлева – по взаимодействию мостов с подвижной нагрузкой. А также участие М. И. Казакевича (научного консультанта автора статьи по докторской диссертации [17]) в разработке и внедрении в реальные объекты многих прикладных задач классической аэродинамики. В докладе рассматриваются и некоторые предложения [12–14] по уточнению и развитию динамических моделей мостов.

Наконец, в докладе упоминается и о личных встречах с уважаемыми корифеями, в т.ч. – с М. Н. Гольдштейном, – также чрезвычайно яркой личностью и популярным ученым отечественной науки в области механики и динамики грунтов (работа [15] вышла тиражом в 15 тыс. экземпляров!). Описана суть и новых моделей сыпучих сред, и грунтовых оснований [16–18].

Важно отметить и такой факт – все упомянутые школы максимальное внимание уделяли не только теории и расчетам, а и экспериментальным исследованиям, создавали мощную инструментально-приборную базу, растили опытных испытателей и прибористов. Всё это отлично прослеживалось в 1972–73 гг., когда на перегоне Баловка – Березановка самой обособанно-смелой Приднепровской железной дороги месяцами («носился») скоростной вагон-лаборатория (СВЛ) ВНИИВагоностроения и ДИИТа с рекордными до сих пор (прошло 38 лет!) скоростями для рельсовых экипажей (до 250 км/ч !!). В этих рискованных и трудных испытаниях в одной связке сработали все три школы динамики: на тележках и кузове вагона стояли датчики и приборы школы Лазаряна В. А. (ведущие испытатели Ю. В. Дёмин, В. Н. Захаров), на мостах (и под мостами) – школы Н. Г. Бондаря (по городу ходят легенды о музее мостов и испытательной технике кафедры), а на путевых конструкциях и основаниях – школы М. Н. Гольдштейна и М. А. Фришмана.

О новой роли мостов в современной архитектурной среде и о методе динамического формообразования (МДФ) сооружений

В последнее время к виду и функциям мостов, особенно в городской среде и на оригинальных участках ландшафта, особое внимание стали проявлять архитекторы. В помощь им на предпроектной стадии «придумывания самых невероятных мостовых очертаний» можно рекомендовать метод динамического формообразования (МДФ), заключающийся в оперативной оценке качества варианта сооружения по таким важным показателям в мостовых сооружениях, как частоты и формы собственных колебаний объекта. Этот метод перекликается и с новым стандартом ISO, рекомендуемым (правда, пока только для высотных зданий с прямоугольным

планом) конкретные величины рациональных частот, связанные с параметром сооружения (для зданий – с высотой) и их расположение на частотной оси – как бы рекомендуется порядок и последовательность для собственных форм. Пример применения МДФ с участием автора – срочное проектирование и строительство с авторским надзором (на всё мэрия давала 1 месяц!) Памятного знака Космонавтике на пересечении проспекта Гагарина и Запорожского шоссе. Модальный анализ ускорил устранение слабых элементов с низкими частотами и лишь в окончательном варианте – обсчитывались нелинейные демпфирующие устройства трех типов.

Конечно, здесь (для передачи предложений в Технические Комитеты ISO) нужны глубокие наработки и базы данных (с результатами, в том числе, и натурных динамических испытаний) для мостов разных типов, конфигураций и нагрузок. Очень важны и необходимы рекомендации, например, по зависимостям частот нескольких собственных форм от пролетов, от высот пилонов и т.п.

Замечания об ограничениях применения МКЭ при решении инженерно-практических современных задач и об употреблении терминов «подвижная нагрузка», «нелинейности», «взаимодействие» конструкций с основанием, потоком

Рамки статьи не позволяют вспомнить и подробно разобрать «кисюминки» расчетов на подвижные нагрузки таких известных днепропетровских ученых, как А. Б. Моргаевский, И. А. Колесник, С. И. Конашенко, В. П. Орленко и других. Подчеркнем только тот факт, что им, пожалуй, было бы трудно сегодня объяснить, почему при современном развитии компьютерно-вычислительной техники инженеры, как и почти 170 лет назад, продолжают считать мосты и путь на какие-то статические эквиваленты подвижной нагрузки? Возможно, здесь виноваты коммерческие интересы авторов универсальных вычислительных комплексов, бурное развитие МКЭ и легкость программирования в нем матричных операций линейной алгебры. Видимо, следует ожидать появления в ближайшее время таких разработок, как, например, брянский «Универсальный механизм», и для мостов! В ДИИТе есть подобные заделы в работах, например, нынешнего лидера мостовиков А. С. Распопова [11].

Ещё в 1996 г. в трудах и двух докладах в ДИИТе на IX-й Международной конференции «Проблемы механики железнодорожного транспорта» автор представил однотипные модели не только движущихся транспортных средств, но и конструкций пути, основания, мостов и иных сооружений, показав их кор-

ректность и эффективность при расчетах динамического взаимодействия транспорта и пути. В качестве примера моделировались колебания балки с дискретным упруго-вязко-фрикционным основанием и односторонними связями при различных видах подвижных нагрузок, результаты сравнивались с классическими работами С. П. Тимошенко и др.

О вариантах разработки новых демпфирующих устройств методом динамического конструирования (МДК) на примере поиска эффективных нелинейных гасителей изгибных колебаний большепролетных конструкций

Большепролетные мосты новых типов имеют ярко выраженные вертикальные, наклонные и горизонтальные элементы значительных размеров, в связи с чем (зачастую даже при небольших динамических нагрузках и воздействиях) они совершают интенсивные изгибные колебания.

Совершенно очевидно, что стабилизация изгибных колебаний подобных сооружений на стадиях проектирования, строительства и эксплуатации должна исследоваться в весьма широком диапазоне различных аспектов:

А. От изучения, во-первых, всевозможных возмущающих динамических нагрузок и воздействий, включая природные (с учетом «векового тренда» и самых последних реалий и неутихождающих глобальных природно-климатических и сейсмических прогнозов) и антропогенные (по «созданию» которых современное неустойчиво развивающееся общество, конечно, ещё не сказало своё «последнее слово»).

В. А также от разработки, во-вторых, новых альтернативных методик уточнения различных «слабых мест» безопасных сооружений в линейных расчетах.

С. И до – понимания возможностей развития нового вида конструирования, научно обоснованного нелинейными расчетами; сюда и отнесем возможности учета и регулировки геометрических, физических и конструктивных нелинейностей.

Длительное действие слабозатухающих во времени колебаний, например, легких металлических конструкций, непредсказуемым образом скажется на сроке службы сооружения. Здесь «непредсказуемость» связана с недостаточной изученностью как новых материалов, так и масштабов объектов, их работы на выносливость и т.д.

Основная идея предлагаемых устройств основывается:

1. на достоверных и специально тестируемых методиках их расчета в составе сооружения при реальных динамических нагрузках и с учетом геометрических нелинейностей;

2. на учете при «отборе устройством энергии у возмущенной конструкции» физических нелинейных свойств устройства или его элементов: пластическое поведение элементов типа «энергопоглотителей»; работа фрикционных элементов с силами сухого трения (наиболее удобный вариант демпфирующих устройств для длительно эксплуатируемых сооружений) и т.п.;

3. на простых конструкторских решениях, применении зазоров, скачков, поглотителей типа динамических или ударных гасителей колебаний (ДГК, УГК) – т.е., систем с конструктивной нелинейностью;

4. на обязательной возможности регулировки основных параметров при установке устройств и при перенастройке их в процессе эксплуатации (после включения в систему сооружения).

По типу гасителей для транспортного машиностроения (см., например, работы И. И. Челнокова, М. М. Соколова, В. Д. Хусидова) могут (и должны!) разрабатываться и применяться для различных конструкций мостовых сооружений и переходов аналогичные решения демпфирующих устройств с обязательным расчетным их сопровождением (для применения, например, в сейсмически активных районах – а теперь, по новым ДБН, это почти вся Украина!) и методиками испытаний и диагностики. Важное значение приобретает корректный переход от сложной линейной системы к упрощенной нелинейной модели, на которой возможен качественный анализ демпферов.

В докладе демонстрируются в качестве примера разработанные совместно ПГАСА и ДонНАСА запатентованные и испытанные в 2009 г. пять вариантов демпфирующих устройств для гашения изгибных колебаний длиномерных конструкций и их элементов. Приводятся дифференциальные уравнения нелинейных колебаний систем и динамические процессы, доказывающие эффективность устройств.

Современный непрерывный мониторинг технического состояния ответственных конструкций и метод динамической диагностики (МДД) и паспортизации сооружений

Работы по теории и многолетним испытаниям мостов и объектов типа СВЛ, музей мостов и старинный мостовой стальной пространственный блок на мостовом кафедральном участке двора ДИИТа, хорошо оборудованные аудитории кафедры позволяют надеяться на благополучное дальнейшее развитие лабораторной базы. Например, – по типу созданной при участии автора в ДонНАСА Лаборатории Динамики Строительных Конструкций – проекты таких лабораторий могут разрабатываться и для дру-

гих организаций (такое предложение было передано в столичные университеты стран Евросоюза через Польскую академию наук). Интересно, что в лаборатории динамических испытаний кафедры металлических конструкций ПГАСА сохранено много оборудования, собранного выпускником академии Б. Г. Кореневым, который долгие годы возглавлял Отделение Динамики ЦНИИСКА, издал три хороших справочника проектировщика по динамическим расчетам в 1981, 1984 и 1986 гг.

Новое развитие (и пути применения МДД с созданием соответствующих методу – динамических и сейсмодинамических паспортов конструкций) получили сегодня и особые, мониторинго-диагностические динамические испытания сооружений. Такая «пассивная вибродиагностика» (по словам активно развивающего её методик и теорию выпускника кафедры «Мосты» ДИИТа Редченко В. П. [19]), проводимая для наиболее ответственных мостов и сооружений, при помощи автоматизированных систем непрерывного мониторинга позволяет следить за текущим техническим состоянием и аварийностью конструкций и принимать оперативные решения – по усилению конструкций, по запрету или изменению режима движения, по эвакуации персонала или строителей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лазарян, В. А. Динамика вагонов [Текст] / В. А. Лазарян. – М.: Транспорт, 1964. – 255 с.
2. Ушкалов, В. Ф. Статистическая динамика рельсовых экипажей [Текст] / В. Ф. Ушкалов, Л. М. Резников, С. Ф. Редько. – К.: Наук. думка, 1982. – 360 с.
3. Теоретическое прогнозирование напряжений в конструкциях проектируемых экипажей [Текст] / В. А. Лазарян и др. // В кн.: Некоторые задачи механики скоростного наземного транспорта. – К.: Наук. думка, 1974. – С. 101-110.
4. Ушкалов, В. Ф. Случайные колебания механических систем при сухом и вязком трении [Текст] / В. Ф. Ушкалов // В кн.: Нагруженность, колебания и прочность сложных механических систем. – К.: Наук. думка, 1977. – С. 16-23.
5. Кулябко, В. В. Моделирование колебаний длиннобазной платформы при детерминированных и случайных возмущениях [Текст] / В. В. Кулябко // В кн.: Нагруженность, колебания и прочность сложных механических систем. – К.: Наук. думка, 1977. – С. 120-127.
6. Кулябко, В. В. Исследование вертикальных колебаний и нагруженности длиннобазных грузовых вагонов [Текст] : автореф. дисс. ... канд. техн. наук: 05.22.07 / В. В. Кулябко – Д., 1978. – 21 с.
7. Бондарь, Н. Г. Нелинейные автономные задачи механики упругих систем [Текст] / Н. Г. Бондарь. – К.: Будівельник, 1971. – 140 с.

8. Динамика железнодорожных мостов [Текст] / под ред. Н. Г. Бондаря. – М.: Транспорт, 1965. – 412 с.
9. Казакевич, М. И. Аэродинамика мостов [Текст] / М. И. Казакевич. – М.: Транспорт, 1987. – 240 с.
10. Загора, А. Л., Гашение колебаний мостовых конструкций [Текст] / А. Л. Загора, М. И. Казакевич; под ред. Н. Г. Бондаря. – М.: Транспорт, 1983. – 134 с.
11. Распопов, О. С. Автоматні та топологічні методи динамічного аналізу просторових стержневих систем [Текст]: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.17 / Распопов Олександр Сергійович. – Д., 2009. – 38 с.
12. Казакевич, М. И. Введение в виброэкологию зданий и сооружений [Текст] / М. И. Казакевич, В. В. Кулябко. – Д.: ПГАСА, 1996. – 200 с.
13. Кулябко, В. В. О расчете мостов и дорог на любые подвижные нагрузки с учетом инерционности, подрессоривания, торможения, разрыва связей, переменных скоростей и интервалов движения [Текст] / В. В. Кулябко, А. В. Макаров // Дороги і мости: зб. статей/ ДерждорНДІ. – Вип. 9. – К.: ДерждорНДІ, 2008. – С. 129-140.
14. Кулябко, В. В. Методы динамического формообразования (МДФ) мостов, конструирования (МДК) их нелинейных демпфирующих элементов и диагностики (МДД) технического состояния [Текст] / В. В. Кулябко // Автомобільні дороги і дорожнє будівництво: зб. статей. – Вип. 73. – К.: МОНУ, НТУ, 2006. – С. 195-199.
15. Гольдштейн, М. Н. Механика грунтов, основания и фундаменты [Текст]: учеб. для вузов ж.-д. трансп. / М. Н. Гольдштейн, А. А. Царьков, И. И. Черкасов. – М.: Транспорт, 1981. – 320 с.
16. Банніков, Д. О. Сипучий матеріал в ємнісній конструкції [Текст] : монографія / Д. О. Банніков. – Д.: Моноліт, 2009. – 172 с.
17. Кулябко, В. В. Розвиток динамічних моделей, розрахунків та випробувань складених конструкцій і споруд [Текст] : автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.01 / В. В. Кулябко. – Д., 1998. – 32 с.
18. Кузьменко, В. И. Модели статического и динамического взаимодействия сооружений с основаниями сложных типов (по включениям и свойствам) [Текст] / В. И. Кузьменко, В. В. Кулябко, Ю. Е. Власенко // Пространственные конструкции зданий и сооружений (Исследования, расчет, проектирование и применение): сб. статей. – Вып. 12. – М.: МООПК, РААСН, НИИЖБ, ЦНИИСК, ЦНИИПСК, 2009. – С. 194-202.
19. Редченко, В. П. Особливості застосування спектрального аналізу при дослідженні коливальних будівельних конструкцій [Текст] / В. П. Редченко. – Д., «Пороги», 2010. – 95с.

Поступила в редколлегию 19.04.2010.
Принята к печати 23.04.2010.