

УДК 624.042

**РАЗВИТИЕ И ВНЕДРЕНИЕ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ
РАСЧЕТНЫХ МОДЕЛЕЙ И МЕТОДОВ
В ЗАДАЧАХ ДИНАМИКИ СООРУЖЕНИЙ**

*д. т. н., проф. Кулябко В. В.**, *д. т. н., проф. Кущенко В. Н.***,
*асс. Нечитайло А. Е.****, *асс. Ярошенко Д. С.**,
*инж. Макаров А. В.*****, *инж. Масловский А. В.******

**ГВУЗ «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», г. Днепропетровск;*

*** ГВУЗ «Национальный университет «Львовская политехника»», г. Львов;*

**** ГВУЗ «Донбасская национальная академия строительства и Архитектуры», г. Макеевка;*

*****ООО ПИ «Днепрпроектстальконструкция», г.Днепропетровск;*
******ИМЦ-Украина, г. Днепропетровск*

подавляющее большинство современных проектно-строительных работ в нашей стране сопровождается широким применением отечественных вычислительных программных комплексов (ПК), основная функция которых – выполнить расчет напряженно-деформированного состояния (НДС) строительных конструкций при воздействии на них статических и динамических нагрузок.

Бесспорно, что качество проектов и длительность безаварийной эксплуатации сооружений почти целиком зависят от научно-профессионального уровня специалистов, от их материально-технического обеспечения, от необходимой возможности постоянного отслеживания и учета многих переменных в этом процессе. Сюда относятся уточнения всех видов нагрузок, параметров и характеристик новых строительных материалов, а также - условий взаимодействия конструкций (особенно новых увеличенных размеров) с грунтовыми основаниями, с воздушными потоками, с подвижными нагрузками (включая транспорт и различное технологическое оборудование).

Решению проблематики обновления нормативных материалов по статическим и, в особенности, динамическим нагрузкам и воздействиям, по мнению авторов, уделяется слишком мало внимания. Приведём лишь два примера последних лет: падение крупного высотного копра на Донбассе и запрет, более чем на год, движения грузового транспорта по Волгоградскому мосту, прозванному

«танцующим», до выполнения немецкой фирмой специальных исследований и работ по стабилизации пролетных строений при критических скоростях ветра.

Авторы данной статьи рассматривают практически важные теоретические и экспериментальные вопросы повышения качества безопасного проектирования (термин отметок на чертежах Великобритании) и эксплуатации сооружения на всех его этапах. Так, развивались методики расчета нелинейных свободных и вынужденных колебаний и нагруженности рамных конструкций многоэтажных и многопролетных зданий и сооружений [1]. Испытывались надшахтные укосные копры [2,3,4], мостовые краны-перегрузатели (см. статью Макарова А.В. в данном сборнике), особые виды демпфирующих устройств применялись для жесткой ошиновки на открытых распределительных устройствах (ОРУ) электрических подстанций (некоторые работы выполнялись совместно ДонНАСА, ДПСК и ПГАСА [5]).

Отечественные ПК практически не могут выполнять учет разнообразных упругих и диссипативных нелинейных характеристик в процессе динамических расчетов во временной области (численные решения ПК обычно ограничиваются линейными задачами с применением МКЭ). Поэтому были созданы особые алгоритмы компьютерного моделирования с альтернативными способами учета многообразных видов характеристик сооружений, с составлением и решением (методом Рунге-Кутты) нелинейных дифференциальных уравнений движения при статико-динамических «совместных» нагрузениях [6].

В данной статье (и докладе), **в целях привлечения к сотрудничеству «специализированных спонсоров», разработчиков ПК и квалифицированных программистов**, обобщаются некоторые приемы расчета и конструирования сложных ответственных сооружений и даются примеры поиска рациональных путей стабилизации рассмотренных типов сооружений.

В докладе обсуждаются **недостатки существующих методов** расчетных комплексов, базирующихся на МКЭ:

- *неопределенность в учете фактических диссипативных свойств каждого элемента сложно-составного сооружения.* Определённые с большим трудом в натурном эксперименте логарифмические декременты колебаний подсистем иногда отличаются на порядок, а в ПК они «усредняются» на всё сооружение, меняя результаты вынужденных колебаний «в разы»;

- необходим учет наиболее характерных (для каждой задачи) из четырёх известных групп **нелинейностей**: геометрическая, физическая, конструкционная и генетическая;

- в **нелинейных системах** (в которых нельзя применять принцип **суперпозиции**) нельзя «разрывать» (считать отдельно и потом складывать результаты) расчеты на статическую и на динамическую нагрузки, их надо выполнять одним нагружением в нелинейной постановке **во временной области**;

- **подвижные нагрузки** (включая сложно-инерционные транспортные) и **ветровые (воздушные) потоки** должны рассматриваться **только в динамическом** (аэродинамическом, с учетом вихревого возбуждения, галопирования, бафтинга и т.п.) **взаимодействии с сооружением**;

- **конструктор новых демпфирующих устройств** должен, безусловно, иметь возможность их **корректного всестороннего расчета** (с оценкой эффективной стабилизации) в динамическом взаимодействии с сооружением, а также возможность **опытно-экспериментальной** проверки новых решений!

Для преодоления всех указанных проблем и предлагается методика расчета, альтернативная МКЭ, который во многих важных задачах уже является тормозом прогресса. Она реализуется в виде **трёх методов динамического**: формообразования (МДФ), конструирования (МДК) и диагностики (МДД). Обеспечивают эти методики корректные динамические модели и группы нелинейных дифференциальных и дополняющих их алгебраических уравнений.

В результате МДФ (альтернативный интегральный показатель достоинств объекта) позволяет **архитектору-конструктору** быстро синтезировать конструкции сооружения с наперёд заданными свойствами (анализ начинается с низших частот и форм собственных колебаний). Например, в сжатые сроки был запроектирован и построен Памятный знак Космонавтике на проспекте Гагарина Днепропетровска. Создан уже и стандарт ISO для высотных зданий (пока - с прямоугольным планом).

МДК вооружает **инженера-конструктора** возможностью реализации любых его инженерных фантазий по работе демпфирующих устройств, гасителей и поглотителей, создаваемых на базе корректных расчетов нелинейных систем.

Наиболее массовым, возможно, будет применение МДД на основе проведения натуральных периодических (первичных и текущих) динамических испытаний сооружения. Составленные **паспорта** (динамические, сейсmodинамические, вибротехнологические,

виброэкологические и др.) должны стать основным документом текущего **мониторинга** конструкций, **зонинга** территорий.

Ниже рассмотрены примеры решения задач динамики сложных сооружений и способы их стабилизации.

Укосные шахтные копры являются наиболее ответственными сооружениями шахтной поверхности [2]. В настоящее время в Украине наблюдается тенденция увеличения глубины шахтных стволов до 1200...1300м, что приводит к увеличению высоты укосных копров до 60...70м, а также к возрастанию динамических нагрузок от натяжения подъёмных канатов [2].

Наиболее значимой нагрузкой на конструкции шахтных копров является нагрузка от натяжения подъёмных канатов [2, 3]. Данная нагрузка имеет переменный характер по мере спуска (подъёма) грузового сосуда [2, 4]. Вследствие движения подъёмного сосуда меняется мгновенная частота собственных колебаний этого сосуда на канатной подвеске и график её изменения в зависимости от длины каната (кривая 6 на рис. 1) пересекает спектр частот копра.

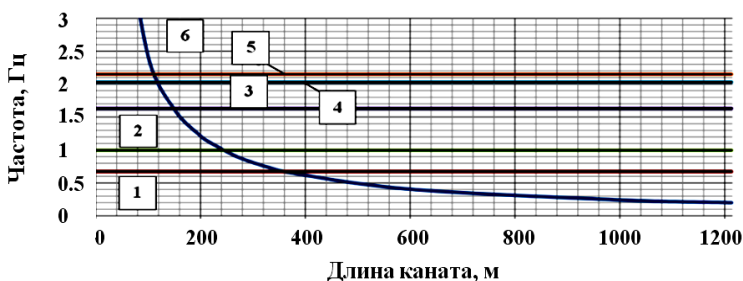


Рис. 1. Диаграммы изменения динамических характеристик подсистем копра в процессе работы подъёмной машины на примере полушатрового скипового копра (линии, считая снизу вверх): 1 – частота вращения направляющего шкива; 2 – частота 1-й формы собственных колебаний копра (изгибные в направлении подъёмной машины); 3 – частота 2-й формы собственных колебаний копра (в вертикальном направлении); 4 – частота 3-й формы собственных колебаний копра (изгибные в направлении перпендикулярно плоскости работы подъёмной машины); 5 – частота 4-й формы собственных колебаний копра (крутильные колебания копра вокруг вертикальной оси); 6 – переменная частота колебаний груза на канате.

Частоте вращения шкива (элемент возмущающих нагрузок) при работе копра соответствует линия 1. Частоты четырех низших форм

собственных колебаний копра отмечены линиями 2-5, это как бы парциальные собственные частоты копра. Из графиков видно, что на отдельных величинах длины каната в системе могут активизироваться совпадающие резонансные явления.

В подобных неблагоприятных для строительных конструкций случаях возникает необходимость в гашении колебаний, возникающих в ходе эксплуатации сооружений, а также – в применении методов МДК и МДД для обеспечения безопасной эксплуатации укосных шахтных копров. Так, следует рассмотреть эффективность установки в горизонтальной плоскости двух динамических гасителей колебаний (ДГК) в зоне подшивных конструкций в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

Результаты динамических расчетов модели упомянутого выше **крана-перегрузателя** без ДГК и с ДГК (масса ДГК принималась равной $1/20$ от массы модели крана по первой форме собственных колебаний) и возможная схема конструктивного исполнения ДГК приведены на рис.2.

Расчеты показывают, что применение ДГК с принятой массой применительно к крану позволяет снизить амплитуды его вынужденных колебаний более чем в 60 раз.

Наконец, если длинномерные конструктивные элементы или всё крупное сооружение совершает **изгибные колебания** с опасными или дискомфортными амплитудами, то в таких случаях эффективными могут оказаться конструктивные **стабилизационные элементы**, запатентованные ПГАСА совместно с ДонНАСА. Опишем кратко суть и нелинейную механику работы этих **демпфирующих устройств** [5] (авторы патентов: Кулябко В.В., Мушанов В.Ф., Масловский А.В., Денисов Е.В.).

Так, система патента 40431 подразумевает гашение отдельно (вместе) балок, труб и других элементов, например, перекрытий, пространственных связей и т.п., путем установки в необходимой плоскости ДГК с дополнительным использованием виброударного эффекта о балку - при параллельной установке ДГК с балкой.

Следующие три патента используют фрикционные элементы. В патенте 40099 внутри (или снаружи) сечения балочного элемента на его торцах натянута струна, которая при колебаниях элемента сопротивляется перемещениям с помощью закрепленных на ней упруго-демпфирующих узлов и материалов. Идея патента 40434 – в присоединении к основной конструкции (с некоторым прижимным усилием и возможностью взаимных сдвиговых деформаций) дополнительной параллельной системы труб, полос, балок. От

опасных резонансных явлений вихревого возбуждения открытых конструкций сооружений может спасти конструкция по патенту 40094 (проволочная навивка, закрепленная только на торцах элемента, не только срывает вихри, но и повышает логарифмический декремент колебаний системы при изгибных деформациях конструкции). Таким же образом в патенте 40435 используются позиционные силы сухого трения при относительных смещениях соединительного воротника (с клиновыми демпферами) между элементами, связями, тросами.

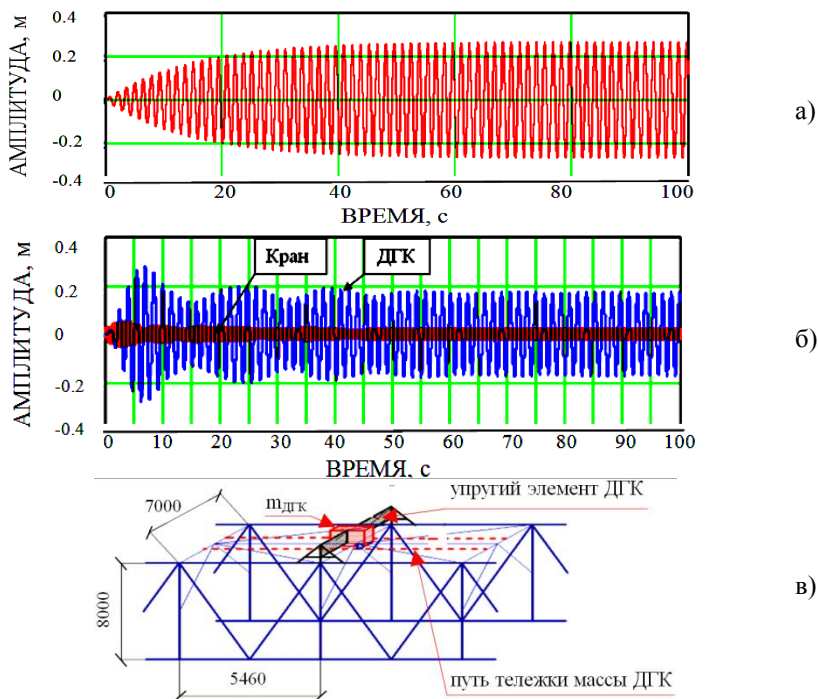


Рис.2. Виброграммы вынужденных колебаний крана на резонансной частоте без ДГК (а) и с ДГК (б), схема возможного конструктивного исполнения ДГК (в)

Выводы. Рассмотренные методы моделирования и расчетов конструкций и сооружений могут служить альтернативными, уточняющими и проверяющими методиками для расчета, конструирования и диагностики (как развитие неразрушающих методов контроля), в первую очередь, - для ответственных и сложных сооружений. Даны примеры создания демпфирующих устройств.

Результаты, полученные в работе, позволяют расширять спектр задач, решаемых ПК, улучшать качество этих расчетов и углублять сотрудничество ученых, программистов и проектировщиков (особенно – при наличии грантовой поддержки). Описанные разработки могут быть рекомендованы для использования в проектировании и эксплуатации строительных и машиностроительных объектов, а также в обучающих программах вузов.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Ярошенко Д.С. Розробка схем та способів розрахунку нелінійної динамічної взаємодії споруд рамного типу з демпфіруючими пристроями: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.23.01 «Будівельні конструкції, будівлі та споруди» / Д.С. Ярошенко. – Дніпропетровськ, 2014. – 21 с.
2. Кущенко В. Н. Обеспечение безопасности строительных конструкций укосных шахтных копров [Текст] : Монография / В. Н. Кущенко ; Донбасская нац. акад. стр. и арх. – Макеевка : ДонНАСА, 2006. – 202 с.
3. Kuschenko, Volodymyr. Experimental research of the mode of deformation of sub-pulley structures of shaft frame-type sloping headgear [Текст] / Volodymyr Kuschenko, Alexander Nechitaylo // Металеві конструкції. – 2013. – Т. 19, № 3. – С. 143–154.
4. Кущенко, В. М. Анализ усталостной прочности узлов опирания многоканатных шкивов трения рамного шахтного копра [Текст] / В. Н. Кущенко, А. Е. Нечитайло // Сборник докладов по материалам XIII Международной конференции «Материалы. Методы. Технологии», 18–22 февраля 2013 г. / редкол. Главацкая и др. – Плавья : УИЦ, 2013. – С. 103–105.
5. Ways of antihunting rigid conductors structures of outdoor switchgears of the power supply network construction / [Ye. V. Gorokhov, V. F. Mushchanov, V.V.Kulyabko, E.V. Denisov, A. V. Maslovsky] // Book «The 10th Intern. Conf. "Modern Building Materials, Structures and Techniques". - 2010. Publisher Vilnius Gediminas Techn. Univ. "Technika". – P. 619–627.
6. Кулябко В.В. Динамика сооружений – прошлое, настоящее и будущее (часть 1) [Текст] : Монография / В. В. Кулябко; LAMBERT Academic Publishing, 2014. – 172 с.