

УДК 539.3

А. А. ПОДДУБНЫЙ, кандидат физико-математических наук, Белорусский государственный университет транспорта, *В. А. ГОРДОН*, доктор технических наук, Орловский государственный университет имени И. С. Тургенева

ОСОБЕННОСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ КОНСТРУКТИВНО-НЕЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ НА ПРИМЕРЕ МОСТОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Приведена краткая характеристика причин разрушения мостов и этапов их восстановления с учетом напряженно-деформированного состояния мостовых конструкций в нелинейной системе. Представлен анализ инженерных методик проектирования и расчета, учитывающие внезапные перестройки и повреждения конструктивных элементов мостовых конструкций.

Введение. Напряженно-деформированные состояния мостовых конструкций в нелинейной постановке задачи (учет нелинейных характеристик материала конструкции, геометрической нелинейности и т. п.) являются конструктивно-нелинейными, так как при их математической формализации используются неравенства и недифференцируемые функции. При этом в задачах конструктивной нелинейности изменение расчетной схемы осуществляется по мере деформирования конструкции, например, в момент достижения некоторой точки конструкции определенной величины прогиба, когда возникает контакт этой точки с опорой.

Следует отметить, что материал мостовой конструкции подчиняется нелинейному закону деформирования, который может быть и несимметричным в связи с различными пределами сопротивления растяжению и сжатию. Помимо этого в геометрически нелинейных задачах отсутствует прямая пропорциональность между нагрузками и перемещениями, что на практике приводит к большим перемещениям при малых деформациях.

В связи с вышеизложенным повышение качества проектирования мостовых конструкций при рациональном использовании материальных ресурсов, а также обеспечении надежности и безопасности эксплуатируемых и реконструируемых мостов является одной из важнейших задач строительной механики.

Направления научных исследований. Согласно действующим нормам расчет мостовых элементов выполняется по предельным состояниям и ставит задачу исключить наступление предельных состояний конструкций. Однако практика возведения и эксплуатации различных объектов показывает, что и тогда, когда они запроектированы в соответствии с нормативными документами, возникают аварийные ситуации от воздействий, не предусмотренных проектом, квалифицируемых как запроектные.

Это связано, прежде всего, со значительным износом основных фондов, с ростом различного рода агрессивных воздействий техно- и антропогенного происхождения, включая террористические действия, с непродуктивными и некачественно выполненными реконструкционными мероприятиями. Поэтому для сокращения числа запроектных аварийных ситуаций или снижения ущерба и жертв при их возникновении необходим анализ «чувствительности» проектируемых и эксплуатируемых мостовых конструкций к различным изменениям в их проектах, несовершенствам в изготовлении, вариациям внешних воздействий, структурным перестройкам под нагрузкой и другим фак-

торам. Особенно опасными являются внезапно образующиеся повреждения, так как фактор мгновенности приводит статически нагруженную конструкцию в движение (колебания), в ходе которых перемещения, деформации и внутренние усилия могут превысить допустимые значения.

Важной проблемой механики является разработка и внедрение аналитических и численных методов, которые будут учитывать внезапные изменения расчетной схемы конструкции, описывать специфику и характеристики динамических процессов. В процессе возникающих изменений происходит перераспределение внутренних усилий и деформаций. Разработанные методики в ходе и результате процессов, связывали бы уровни динамических приращений напряжений и деформаций с уровнями конкретных запроектных воздействий типа выключения опорных связей, расслоений, трещинообразования, частичного разрушения, обрывов арматуры и т.д.

Разработка методов расчета, учитывающих влияние на напряженно-деформированное состояние и динамику конструкции внезапно образующихся дефектов, является насущной необходимостью для прогнозирования их поведения и оценки живучести, под которой подразумевается способность конструкции выполнять заданные функции в полном или ограниченном объеме при отказе одного или нескольких элементов системы. Пока изучению влияния на прочность, устойчивость внезапных эксплуатационных повреждений конструкций в научной литературе не уделяется должного внимания. Их решение открывает возможности построения теоретических основ безопасности и прогнозирования поведения конструкций, зданий и сооружений. Включение такого прогноза в качестве дополнения к основным положениям расчета несущих конструкций по предельным состояниям повысит безопасность проектируемых и реконструируемых мостов.

На сегодняшний день инженерные методики проектирования и расчета, учитывающие внезапные перестройки и повреждения конструктивных систем, малочисленны и далеки от совершенства. В работах Поддубного А. А. и Яровой А. В. рассмотрены деформирования трехслойного стержня, частично опертого на упругое основание [1–3]. Модель несимметричного по толщине упругого трехслойного стержня, частично опертого на упругое основание представлена на рисунке 1.

Разработанная математическая модель позволяет решать задачи деформирования ступенчато-перемен-

ных конструкций, опирающихся на основания разной жесткости.

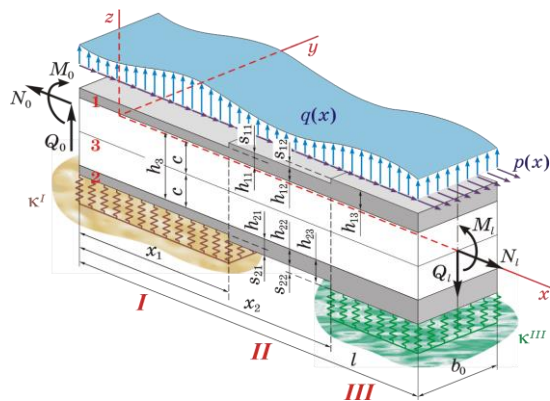


Рисунок 1 – Модель несимметричного по толщине упругого трехслойного стержня, частично опертого на упругое основание

В работах Гордона В. А. рассмотрены результаты моделирования переходных динамических процессов, возникающих в нагруженных балках и пластинах при внезапных повреждениях опорных связей, образованных поперечных и продольных трещинах, расслоениях и отслоениях, частичных разрушениях, изменении условий опирания и сопряжения элементов конструкций [4–6]. Все указанные работы выполнены при-

менительно к свободным, т. е. не поддерживаемым протяженными основаниями, балкам и пластинам.

Представляет теоретический интерес и практическую важность распространение аналогичных подходов к стержням и балкам на упругих основаниях.

В настоящее время методика анализа переходных динамических процессов, инициируемых внезапными эксплуатационными преобразованиями и повреждениями, составляющих системы «балка – основание», только разрабатывается. В известных работах рассматриваются задачи прочности и динамики таких систем с дефектами, образовавшимися квадратически, без возникновения инерционных сил. Внезапное образование дефекта приводит к снижению общей жесткости системы, которая не обеспечивает статическое равновесие. Возникшие инерционные усилия вызывают динамическую реакцию, перераспределение и рост деформаций и напряжений. В результате возможно нарушение штатного функционирования конструкции либо потеря несущей способности и разрушение, что приводит к появлению конструктивной нелинейности.

В таблице 1 приведена краткая характеристика причин разрушения мостов и этапов их восстановления с учетом недостаточного расчета напряженно-деформированного состояния мостовых конструкций, включая конструктивно нелинейность системы.

Таблица 1 – Краткая характеристика причин разрушения мостов и этапов их восстановления

Причины разрушения мостов	Место расположения	Краткая характеристика этапов восстановления	Способы предотвращения разрушения мостов
<p><i>Военные действия</i></p> 	<p>Сербия, река Дунай (мост братства и единства, 1999 г.)</p>	<p><i>Первый этап</i> – краткосрочное (использование инвентарных быстровозводимых переправ, мостов и конструкций); <i>Второй этап</i> – восстановление по старой оси или строительство нового моста на ближнем или дальнем обходе</p>	<p>Заблаговременная подготовка сил и средств</p>
<p><i>Стихийные бедствия</i></p> 	<p>Российская Федерация, наводнение в Туапсе (река Макопсе, 2018 г.)</p>		<p>Организация активной противовоздушной обороны</p>
<p><i>Аварийные ситуации при столкновении</i></p> 	<p>Республика Беларусь, ст. Прибор, Гомельский район (река Уза, 2001 г.)</p>		<p>Спланированная система обеспечения живучести объекта</p>
			<p>Спланированная система обеспечения живучести объекта</p>

Причины разрушения мостов	Место расположения	Краткая характеристика этапов восстановления	Способы предотвращения разрушения мостов
<p><i>Резонанс (последствия динамических крутильных колебаний из-за недоучета ветровых нагрузок при проектировании сооружения)</i></p> 	<p>США, штат Вашингтон. Висячий мост (пролив Такома-Нэрроуз, 1940 г.)</p>		
<p><i>Ошибки при проектировании, строительстве и эксплуатации</i></p> 	<p>Республика Беларусь, Витебск (река Западная Двина, 2007 г.)</p>		

Выводы. На сегодняшний день проблемы устойчивости и колебаний стержней (свай), полностью или частично заглубленных в грунт, которые следует рассматривать с позиций конструкционной нелинейности, изучены недостаточно. Учитывая практическую значимость проблемы обеспечения прочности, живучести и устойчивости таких систем и отсутствие в известных источниках работ, посвященных исследованию динамики и устойчивости конструктивно-нелинейных стержней (свай) на упругом основании, рассмотренное научное направления исследований следует считать актуальным.

Список литературы

1 **Яровая, А. В.** Механико-математическая модель деформирования неупругой трехслойной балки, частично опертой на упругое основание / А. В. Яровая, А. А. Поддубный // Теоретическая и прикладная механика. – 2015. – № 30. – С. 256–262.

2 **Поддубный, А. А.** Теоретическое и экспериментальное определение перемещений трехслойной балки при неполном контакте с упругим основанием / А. А. Поддубный, А. В. Яро-

вая // Мир транспорта и технологических машин. – 2015. – № 3(50). – С. 256–262.

3 **Яровая, А. В.** Деформирование упругой трехслойной балки, частично опертой на упругое основание, под действием равномерно распределенной нагрузки / А. В. Яровая, А. А. Поддубный // Теоретическая и прикладная механика. – 2016. – № 31. – С. 242–246.

4 **Gordon, V.** Dynamical processes analysis in the load beams after partial destruction / V. Gordon, O. Pilipenko // Proc. of the 6-th Intern. conf. on computational methods in structural dynamics and earthquake engineering. – Island of Rhodes, Greece, 2017. – Vol. 2. – P. 3847–3861.

5 **Gordon, V.** The reaction of the «beam-foundation» system to the sudden change of the boundary conditions. Matec Web of Conference, Vol.188, 03008(2018) / V. Gordon, O. Pilipenko, V. Trifonov / 5-th Intern. Conference of engineering against failure Island of Chios, Greece, June 20–22, 2018.

6 **Gordon, V.** Dynamic effect at sudden structural rebuilding of the beam-foundation system / V. Gordon, O. Pilipenko, V. Trifonov / Proc. of ISMA 2018 and USD 2018, p. 1571–1580. Intern. Conference on Noise and Vibration Engineering and Intern. Conference on Uncertainty of Structural Dynamics, September, 17–19. (2018), Leuven, Belgium.

Получено 01.11.2018.

A. A. Poddubny, V. A. Gordon. Especially the study of structurally nonlinear systems on the example of bridge structures.

A brief description of the causes of destruction of bridges and the stages of their recovery, taking into account the stress-strain state of bridge structures in a nonlinear system. The analysis of engineering methods of design and calculation, taking into account the sudden restructuring and damage to structural elements of bridge structures.