УДАР ЛЕТЯЩЕГО ОБЪЕКТА О ПОДВЕСКУ ВИСЯЧЕГО МОСТА С АНАЛИЗОМ РАЗРУШЕНИЙ

В.Б. Зылев, Н.А. Григорьев

Московский государственный университет путей сообщения Императора Николая II (МГУПС (МИИТ)), г. Москва, РОССИЯ

Аннотация: Изложен алгоритм решения задачи ударного взаимодействия для стержневой системы. Интегрирование уравнений движения делается шаговым численным методом по явной вычислительной схеме с привлечением экстраполяции по Адамсу. Рассматривается задача об ударе летящего автомобиля в подвеску висячего моста. Задача решается как пространственная. Показывается, что в зависимости от значения разрывного усилия в подвесках моста реализуются два сценария поведения системы: с локальным и глобальным разрушением конструкции.

Ключевые слова: стержневая система, контактное взаимодействие, уравнения движения, удар летящего предмета, висячий мост, локальное разрушение, глобальное разрушение

CLASH OF FLYING OBJECT WITH A SUSPENDER OF SUSPENSION BRIDGE WITH DAMAGE ANALYSIS

Vladimir B. Zylev, Nikita A. Grigoryev

Moscow State University of Railway Engineering (MIIT), Moscow, RUSSIA

Abstract: The algorithm for solving the problem of shock interaction of a rods system is being considered in the article. Integration of the equations of motion being done with step numerical scheme with extrapolation by Adams method. We considered the problem of the clash of flying car with a suspender of suspension bridge with further damage analysis. The task is solved as a spatial. It is shown that depending on the breaking force in the suspender of suspension bridge can be realized two scenarios of system behavior: the local and the global destruction of the bridge.

Key words: cable-rod systems, contact interaction, suspension bridge, clash of flying objects, step method of numerical integration of the equations of motion, local collapse, progressive collapse

Задача соударения движущегося объекта с конструкциями различного типа возникает, например, при расчете на воздействие торнадо. Известно [1], что сильные торнадо способны поднимать в воздух весьма тяжелые и массивные элементы разрушенных зданий, автомобили и т.д. Для объектов атомной энергетики существуют нормативные документы, в которых установлены соответствующие регламенты расчета [2]. Для высотных сооружений, уникальных мостов, подобные задачи так же являются актуальными. B настоящей работе рассматривается численное решение задачи соударения на основе использования явной вычислительной схемы интегрирования уравнений движения. Задача рассматривается как геометрически нелинейная. Используемый численный метод был получен в [3] и подробно описан в [4,5]. Расчетная схема конструкции создается с использованием стержневых элементов, работающих на растяжение-сжатие.

Суть метода интегрирования уравнений движения заключается в том, что на каждом временном шаге интегрирования уравнений движения, по координатам узлов системы вычисляются усилия во всех элементах расчетной схемы. Эти усилия прикладываются к сосредоточенным в узлах расчетной схемы массам и, таким образом, становятся известными ускорения узловых точек, что позволяет определить приращения координат и скоростей узлов на рассматриваемом временном шаге. Экстраполяция по Адамсу позволяет существенно увеличить шаг интегрирования по времени при обеспечении необходимой точности решения.

Наиболее сложная часть задачи соударения заключается в вычислении контактных сил при соударении трехмерных деформируемых тел, которые необходимо определять на каждом шаге интегрирования уравнений движения. Поясним основные этапы решения этой задачи.

В одном из соударяющихся тел выбираются узлы на поверхности, которые далее будем называть внешними. Эта операция делается вручную на стадии разработки модели. В другом соударяющемся теле назначаются треугольные граничные области, которые будем далее называть контактными треугольниками. Необходимо определить нормальные и касательные (по отношению к плоскости каждого контактного треугольника) составляющие сил взаимодействия. Касательные силы взаимодействия должны подчиняться закону Кулона с коэффициентом трения f.

На рассматриваемом временном шаге, по известным координатам узлов определяются контактные треугольники и внешние узлы, которые вступают во взаимодействие. Модель содержит некоторые условные контактные пружины, через которые внешние узлы соприкасаются с контактными треугольниками. Жесткость этих пружин необходимо назначить в начале решения.

Из предыдущего шага по времени берутся смещения внешних узлов относительно соответствующих контактных треугольников. С использованием жесткостей контактных пружин определяются приращения сил контактного взаимодействия и, таким образом, становятся известными текущие значения этих сил, которые были бы, если бы контакт действительно осуществлялся через пружины. Далее производится проверка, не превысили ли, модули касательных составляющих предельную силу трения по Кулону Nf, где N — значение нормальной составляющей. Если касательная контактная сила больше чем предельная, она уменьшается до предельного значения и можно констатировать, что началось скольжение соответствующего узла по контактному треугольнику.

Выбранные (назначенные) значения контактных жесткостей меняют в определенной степени расчетную схему, т.к. являются ее составляющими. Вообще говоря, контактные следует жесткости назначать возможно большими, что будет соответствовать условию отсутствия взаимного проникновения соударяющихся тел в месте касания. Очень сильно увеличивать контактные жесткости, однако нельзя, т.к. это приведет к необходимости уменьшения шага интегрирования. Практически контактные жесткости назначаются так, чтобы они были близки к жесткостям конечных элементов, примыкающих к контактной области. Перейдем к рассмотрению примера.

На рис. 1. Показана расчетная схема висячего автодорожного моста, в подвеску которого должен ударятся летящий автомобиль. Центральный пролет по длине равен 609 метров. Сечения всех элементов моста подобраны из статического расчета. До начала динамического расчета было определено статическое положение равновесия от собственного веса и временной нагрузки, что совершенно необходимо для висячей системы, т.к. внутренние усилия определяют струнную жесткость элементов системы. В узлы проезжей части так же присоединялись соответствующие автомобильной массы, нагрузке.

На рис.2 показана расчетная схема автомобиля, начальные скорости узлов которого можно менять, что задаст скорость летящего автомобиля. Можно рассматривать автомобиль-боек, который движется поступательно или вращается по законам движения гироскопа. В данной статье рассмотрено лишь поступательное движение, с постоянной скоростью вдоль продольной оси моста. Небольшую отрицательную составляющую



Рисунок 1. Мост под действием собственного веса и временной нагрузки.



Рисунок 2. Модель автомобиля с контактными треугольниками.

скорости вдоль вертикальной оси автомобиль получает во время подлета к подвеске. На передней поверхности автомобиля расположены контактные треугольники, которые видны на рис.2.

Семь внешних узлов расположено на подвеске-мишени, на уровне предполагаемого удара.

Масса автомобиля 1800 кг. Все подвески моста имеют одинаковые характеристики: погонная масса 75 кг/м, EA=1,183 · 10⁶ кН, разрывное усилие 8281 кН. Подвеска, по которой наносится удар, моделируется при помощи 100 стержневых элементов. Остальные подвески имеют шаг дискретизации значительно больший и с тремя – десятью стержневыми элементами, в зависимости от их длин. Вся схема содержит 1859 узлов и 8572 стержневых элементов.

Во время решения на экран дисплея можно выдавать мультфильм движения с произвольным шагом. Шаг для численного интегрирования наша компьютерная программа определяет автоматически. В данном случае он составляет 0,0000075сек. Этот шаг обеспечивает хорошую точность решения. Теперь перейдем к анализу результатов решения. На рис. 3 показано состояние системы в момент времени t = 0,375 с. при минимальной разрушающей скорости автомобиля 67 м/с. Согласно численному решению в момент времени t = 0,20201с. (0,20203) произошел обрыв подвески, в которую врезается летящий автомобиль. Здесь в скобках указан момент времени обрыва, полученный с уменьшенным в два раза шагом интегрирования. Как видно эти результаты очень близки, следовательно, достигнута хорошая точность решения по временному шагу.



<u>Рисунок 3.</u> Состояние системы в момент времени 0.37с.

Удар летящего объекта о подвеску висячего моста с анализом разрушений



<u>Рисунок 4.</u> Стробоскопический чертеж системы с шагом по времени 0,2 с.

На рис. 4 дан стробоскопический чертеж системы за отрезок времени 1 с шагом 0,2 с. Как видно подвеска оборвалась в месте крепления к балке, что характерно и объяснимо с точки зрения закономерностей отражения волны деформаций от полной или частичной заделки.

На рис. 5 приведены графики изменения усилий в трех подвесках: левее подвескимишени, в самой мишени и подвеске правее от мишени. Как видно, усилия в соседних подвесках существенно возрастают по сравнению со статическими, но немного не достигают значений разрывного усилия и прогрессирующее разрушение не наступает.

Теперь, пусть несколько искусственно, изменим условия задачи, а именно, уменьшим разрывное усилие до 6100 кН.



<u>Рисунок 5.</u> Графики изменения усилий во времени в трех подвесках: верхний график – левее мишени, средний – в самой подвеске-мишени и нижний – правее мишени.



<u>Рисунок 6.</u> Момент полного обрушения моста при t=3,4 с.

Как показал расчет, в этом случае минимальная разрушающая скорость уменьшилась до 55 м/с, при этом наступает последовательное разрушение подвесок, начиная с подвескимишени далее направо, что заканчивается глобальным обрушением всей системы. На рис. 6 показан момент обрушения моста при t = 3,4 с. с разрушением элементов проезжей части.

выводы

- 1. Расчет показал, что при недостаточном запасе прочности подвесок для рассмотренной системы вполне может наступить стадия последовательных разрушений.
- 2. Задачи, подобные рассмотренной, могут возникать и при автомобильной аварии на мосту, при навале самолета на конструкцию. Их решение может быть выполнено аналогично решению рассмотренной здесь задаче.

ЗАМЕЧАНИЕ

Данная работа выполнена в рамках гранта, полученного в фонде «ОСНОВАНИЕ». Учредители фонда:

- ОАО «Институт Гипростроймост»,
- Группа компаний «СК МОСТ».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. **Наливкин Д.В.** Смерчи. – М.: Наука, 1984. – 112 с.

- Саргсян А.Е. Динамика и сейсмостойкость сооружений атомных станций. – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2013. – 550 с.
- 3. Зылев В.Б., Штейн А.В. Численное решение задачи о нелинейных колебаниях системы нитей. // Строительная механика и расчет сооружений, №6, 1986, с. 58-61.
- Зылев В.Б. Вычислительные методы в нелинейной механике конструкций. – М.: НИЦ Инженер, 1999. – 144с.
- Александров А.В., Потапов В.Д., Зылев В.Б. Строительная механика. Книга 2. Динамика и устойчивость упругих систем. – М.: Высшая школа, 2008. – 384 с.

Зылев Владимир Борисович, профессор, доктор технических наук, заведующий кафедрой строительной механики; Московский государственный университет путей сообщения Императора Николая II; 127994, Россия, г. Москва, ул Образцова, д 9, стр. 9; e-mail: Zylevvb@yandex.ru

Григорьев Никита Алексеевич, кандидат технических наук; кафедра строительной механики; Московский государственный университет путей сообщения Императора Николая II»; 127994, Россия, г. Москва, ул Образцова, д 9, стр. 9; Е-mail: Gr_Nik2003@mail.ru

Vladimir B. Zylev, Professor, Dr. Sc., Department of Structural Mechanics, Moscow State University of Railway Engineering (MIIT); 9, Obraztsova Street, 127994, Moscow, Russia; E-mail: Zylevvb@yandex.ru

Nikita A. Grigoryev, Department of Structural Mechanics, Moscow State University of Railway Engineering (MIIT); 9, Obraztsova Street, 127994, Moscow, Russia; E-mail: Gr_Nik2003@mail.ru.