

Событийное моделирование конструкций, содержащих оболочки

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»

Предложен метод компьютерного моделирования конструкций, содержащих оболочки, путем представления как наполнителя, так и элементов оболочки в виде коллектива твердых сфер. Для соседних частиц оболочки постулируется сохранение свойства связанности путем рассмотрения только внутренних столкновений границ модельных сфер. Введено понятие соседства второго порядка. События упорядочены по возрастанию моментов времени, в которые они могут происходить. Исследован процесс столкновения трубчатых конструкций со стенкой и с препятствиями.

Ключевые слова: событийное моделирование, эластичные оболочки, внутренние и внешние отражения.

Введение

Конструкции, элементами которых являются гибкие оболочки, широко используются как в быту, так и в технике. Примерами являются мячи, пластиковые пакеты, крылья дельтапланов и парапланов, подушки безопасности в автомобилях, емкости для хранения нефтепродуктов, надувные макеты бронетехники, аэростаты и дирижабли, транспортные рукава и т.п.[1]. В данной работе рассматриваются двумерные (трубчатые) модели демпфирующих устройств, нашедших применение при создании посадочных модулей космических аппаратов.

Моделирование оболочечных конструкций должно обеспечить получение оценок для длительности контакта с препятствием при столкновении, зависимости скорости и ускорения от времени, изменения температуры как наполнителя, так и оболочки, выяснение пределов прочности оболочки в зависимости от скорости столкновения и формы препятствия.

Теория оболочечных конструкций сложна ввиду необходимости учета упругости, ползучести, наличия нескольких фаз, термодинамических свойств как материала оболочки, так и рабочего тела [2]. Общая теория больших деформаций оболочечных конструкций отсутствует. Поэтому актуальной является задача построения таких математических моделей рассматриваемых объектов, к которым применимы статистические методы снятия информации о параметрах.

1. Метод событийного моделирования

Рассмотрено применение метода молекулярной динамики [3] в модификации событийного моделирования [4, 5]. Рабочее тело (наполнитель) представлено твердыми сферами, в двумерном случае – дисками. Особенностью является предложенное в работе [4] рассмотрение моментов внутреннего столкновения соседних модельных сфер с последующим отражением. Это позволяет моделировать связанные конфигурации модельных частиц. Внешние и внутренние столкновения приведены на рис. 1. Жирными линиями отмечены положения модельных частиц, при которых происходят события-столкновения.

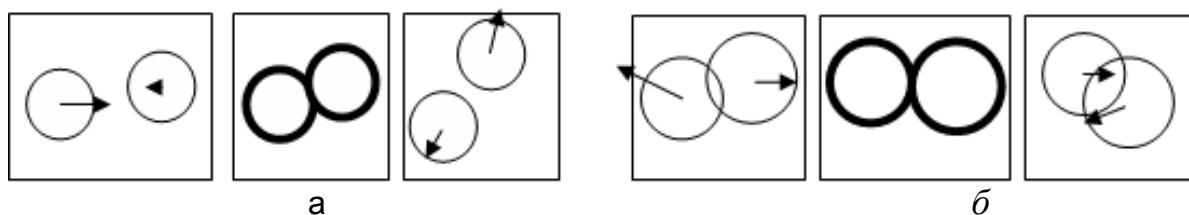


Рис. 1. Два вида столкновений твердых сфер: а – внешнее; б – внутреннее

Согласно работам [4, 5] моделями частиц могут являться двуслойные сферы. Для внутренних сфер (кernов) допускается лишь внешнее отражение.

Для каждой из модельных частиц оболочки составляется список соседей первого порядка. Между соседями первого порядка постулируется взаимодействие, сводящееся к внутреннему отражению. Остальные модельные частицы являются соседями второго порядка. Между соседями второго порядка допускается только внешнее столкновение. Это позволяет управлять модельной степенью гибкости оболочки в целом.

Пусть $R_1, \vec{r}_{10}, \vec{v}_1$ – радиус первой модельной сферы, радиус-вектор ее центра, скорость в некоторый момент времени t_0 ; аналогичные величины для второй сферы обозначим как $R_2, \vec{r}_{20}, \vec{v}_2$. Введем также следующие обозначения: $L = R_1 + R_2$, $\Delta\vec{v} = \vec{v}_2 - \vec{v}_1$, $\Delta\vec{r} = \vec{r}_{20} - \vec{r}_{10}$. Предположим, что в момент времени t расстояние между центрами станет равным L . Тогда приращение времени $\Delta t = t - t_0$ вычисляется согласно формуле $\Delta t_{1,2} = (B \mp \sqrt{D})/A$, где $A = (\Delta\vec{v})^2$, $B = -(\Delta\vec{r}, \Delta\vec{v})$, $D = B^2 - A((\Delta\vec{r})^2 - L^2)$. Столкновение невозможно, если $D \leq 0$. Пусть $D > 0$. Тогда внешнему столкновению соответствует меньший из двух корней $\Delta t_1 = (B - \sqrt{D})/A$, если он положителен: $t = t_0 + \Delta t_1$, $\Delta t_1 > 0$. Внутреннему столкновению соответствует тот случай, когда $\Delta t_1 < 0$, а $\Delta t_2 = (B + \sqrt{D})/A > 0$. Момент времени для внутреннего столкновения такой: $t = t_0 + \Delta t_2$.

И внутренние, и внешние события-столкновения обрабатываются как упругие отражения сталкивающихся сфер. Все моменты наступления событий упорядочиваются по возрастанию. Обработке подвергается только то событие, для которого момент наступления минимален.

Развитие системы n модельных частиц во времени позволяет получать информацию о полной, кинетической, вращательной и тепловой энергиях как для системы в целом, так и для наполнителя и оболочки в отдельности.

Помимо оболочек, соединенных в выбранных точках путем составления списков соседей первого порядка, в состав системы могут быть включены участки, моделирующие полезный груз в виде прямоугольных областей, состоящих из плотноупакованных модельных частиц. Массы частиц груза значительно превышают массы модельных частиц наполнителя и оболочки. Плотная упакованность позволяет рассматривать груз как пластину большой жесткости.

Ведущей величиной при идентификации измеряемых параметров и реальных физических величин является тепловая скорость при заданной температуре. Если модельная средняя квадратичная скорость для модельной частицы принята

равной единице, то ей сопоставляется реальная скорость, рассчитываемая по таблицам физических величин. Это позволяет определить масштаб времени. Пусть линейный размер рабочей области вдоль оси OX принят равным l_x метров, а количество разбиений вдоль этого направления равно n_x . Тогда длина ребра Δx ячейки равна $\frac{l_x}{n_x}$ метров. Перемещаясь вдоль выбранного направления со средней тепловой скоростью \bar{v} , частица пройдет расстояние Δx за время $\Delta t = \frac{l_x}{n_x \bar{v}}$ секунд. Модельное же время равно единице, поскольку длины ребер ячеек квадратной сетки приняты равными единице. Это значит, что если модельное время равно T_{mod} единиц, то реальное время T может быть вычислено из соотношения $T = \frac{l_x T_{mod}}{n_x \bar{v}}$ секунд.

2. Результаты вычислительных экспериментов в двумерном случае

Проведено несколько серий вычислительных экспериментов с моделями демпфирующего устройства, имеющего вид соединенных по образующим цилиндров, наполненных газом. Варьировались такие величины: степень наполненности, отношение массы газа к массе оболочки, скорость движения центра тяжести конструкции по направлению к отражающей стенке, масса внешней части (груза), количество цилиндров и способы их скрепления.

2.1. Отражение свободной конструкции от стенки

Видоизменение формы оболочек, входящих в демпфирующее устройство при отсутствии дополнительной нагрузки, представлено на рис. 2.

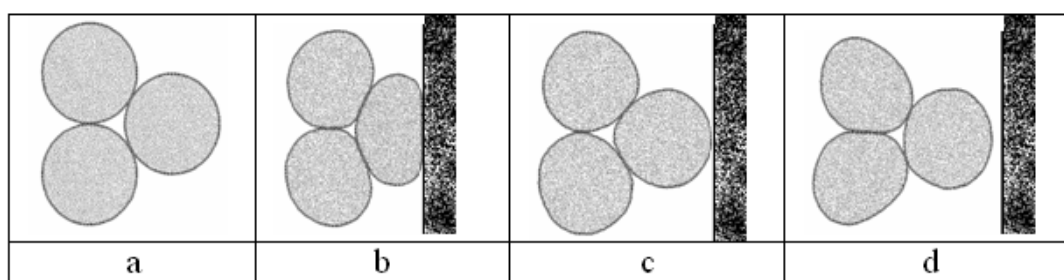


Рис. 2. Четыре фазы формоизменения демпфирующего устройства;
 а – свободное движение;
 б – максимальное сжатие;
 с – момент прекращения взаимодействия;
 д – движение после отражения

Зависимости скорости и ускорения центра тяжести системы от времени даны на рис. 3. Одновременно отслеживалось повышение средней температуры.

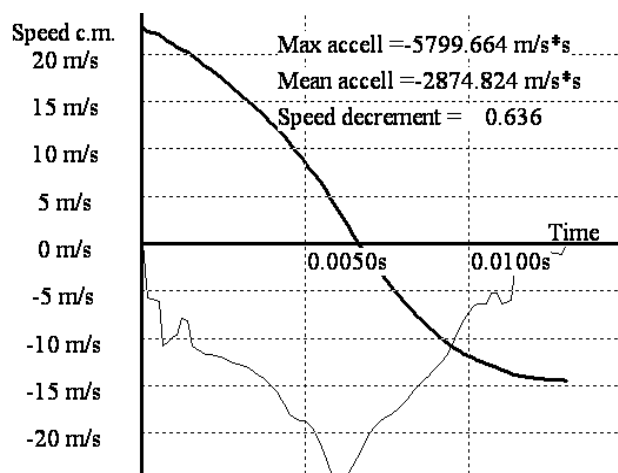


Рис. 3. Зависимость скорости (жирная линия) и ускорения (тонкая линия) центра тяжести от времени

2.2. Столкновения с препятствием

В качестве препятствия рассматривается отрезок, на котором расположены на равных расстояниях центры модельных окружностей особого типа; столкновения с ними других модельных частиц сводятся к отражению от неподвижной сферической поверхности (рис. 4). В результате возникновения локальных нагрузок происходит повышение уровня тепловых колебаний частиц оболочки. При некотором заданном максимальном уровне колебаний в расчетной схеме предусматривается пропуск внутреннего отражения частиц оболочки. Это приводит к ее разрыву с последующим истечением заполнителя. Предельный уровень должен быть определен путем сравнения с реальными экспериментами.

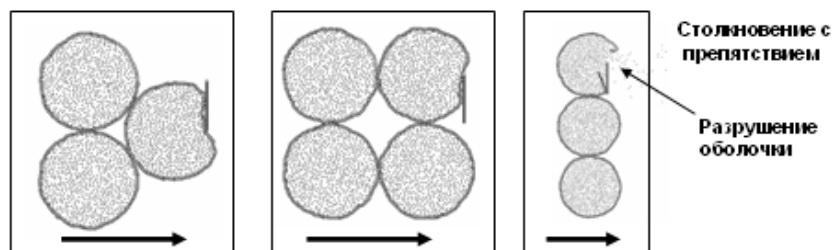


Рис. 4. Моменты столкновений свободных конструкций с препятствием

На рис. 5 приведен процесс столкновения со стенкой участка оболочечной конструкции, к которой присоединен полезный груз.

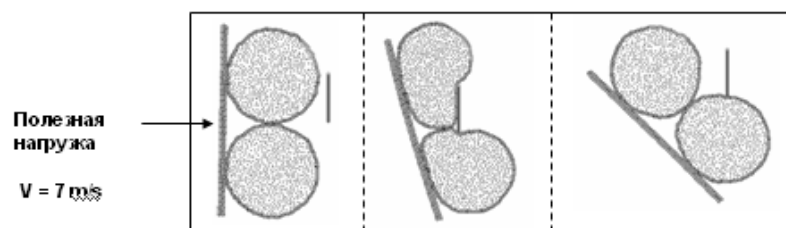


Рис. 5. Моделирование оболочечной конструкции с присоединенным полезным грузом

2.3. Колебания оболочки

Рассматривается модель, приближенная к модели футбольного мяча. Длина окружности большого круга равна 0.71 м, масса – 0.42 кг. Масса воздуха внутри мяча примерно равна 0.006 кг, оболочки – 0.414 кг. Эти данные использованы для задания параметров модельных частиц. Масса оболочки значительно превышает массу заполнителя. Тепловая скорость молекул воздуха при нормальных условиях примерно равна 470 м/с; однако при 2D-моделировании необходимо считать, что единичной виртуальной скорости модельных частиц заполнителя, обладающих единичной массой, соответствует 315 м/с. Это позволяет произвести пересчет виртуальных времени и скорости к соответствующим реальным величинам.

Количество модельных частиц газа в рассматриваемом примере равно 8835, модельных частиц оболочки – 484. Количество событий-столкновений частиц газа за время численного эксперимента равно 24267662, частиц газа с частицами оболочки – 816729, частиц оболочки – 2927809, пересечений границ ячеек сетки центрами модельных частиц – 89353302. Средняя температура после отражения повысилась с 20 до 70⁰С. Общее время расчетов имеет порядок 10 минут при тактовой частоте 2ГГц.

На графике зависимости скорости и ускорения от времени (рис. 6) отражено возникновение колебаний оболочки, частоту которых можно оценить как 1500 Гц.

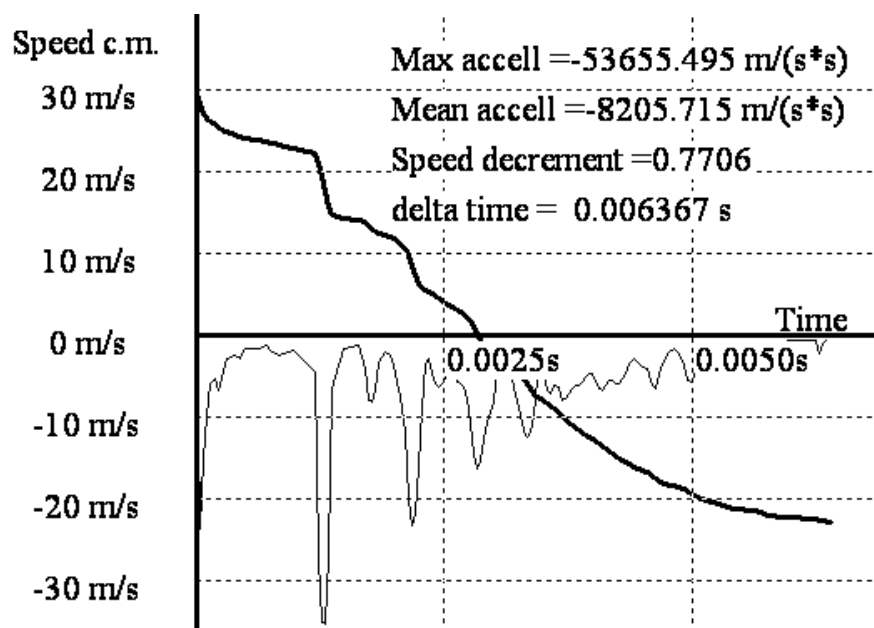


Рис. 6. Колебания оболочки в процессе столкновения со стенкой

Начальное заполнение оболочки модельными частицами имеет некоторые особенности. После того как всем модельным частицам заполнителя приданы случайные направления и величины скорости, следует произвести пересчет скоростей с учетом заданного вектора скорости центра инерции и заданной величины тепловой скорости; виртуальная средняя тепловая скорость принимается равной единице.

3. Событийное моделирование столкновения мяча с препятствием

При переходе к трехмерному случаю необходимо построить сетку на поверхности тела, в узлах которой расположены центры модельных частиц оболочки. Предлагается метод, основывающийся на последовательном разбиении граней икосаэдра на составляющие треугольники с отображением на сферу. При этом возникает последовательность многогранников, вписанных в сферу. Каждая грань – треугольник. Количество вершин N_k таких многогранников связаны рекуррентным соотношением: $N_k = 4N_{k-1} - 6$, $N_0 = 12$. Валентности двенадцати узлов соответствующего графа равны пяти (как и в исходном икосаэдре), остальных – шести.

Две соседние модельные частицы оболочки участвуют в событии-внутреннем отражении, если расстояние между их центрами становится равным длине соединяющего ребра. Таким образом, модельные частицы оболочки в данном случае не обладают сферической симметрией, поскольку равенства длин ребер обеспечить невозможно.

В качестве препятствия рассмотрено множество модельных частиц, центры которых расположены в узлах квадратной сетки. Модельные частицы по периметру препятствия закреплены.

На рис. 7 приведена последовательность конфигураций мяч – препятствие начиная с момента наибольшей деформации. Верхний ряд – изображение «в профиль», нижний – под углом 20° . Начальная скорость свободного движения мяча – 47 м/с; после отражения скорость снижается до 35 м/с. Температура газа внутри мяча в момент наивысшей степени сжатия достигает 170°C .

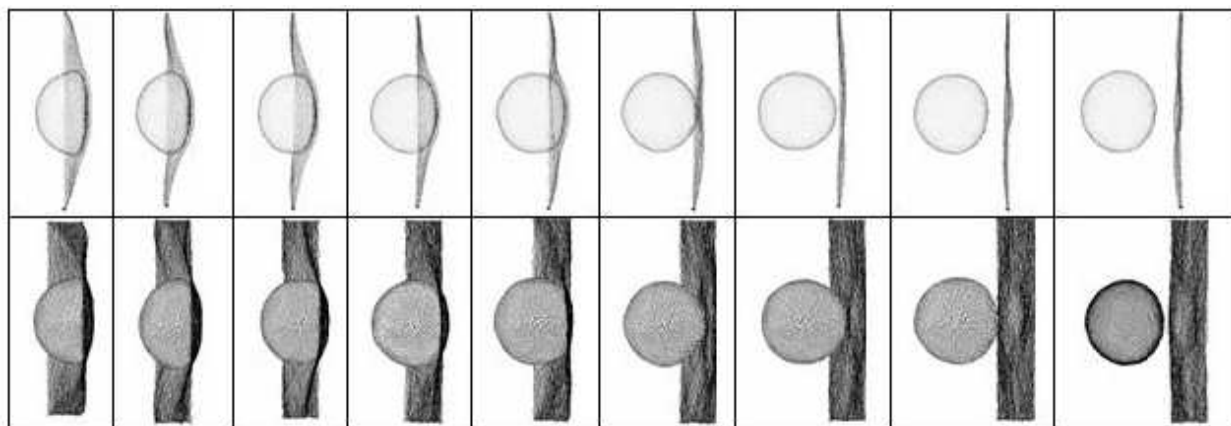


Рис. 6. Деформация мяча и препятствия в процессе столкновения

Выводы и заключение

Разработанный на основе метода событийного моделирования программный продукт дает возможность выполнения численных экспериментов с конструкциями, содержащими оболочки. Рассмотрены $2D$ - и $3D$ - модели столкновений оболочечных конструкций с препятствиями. Для соседних частиц оболочки постулируется сохранение свойства связанности путем рассмотрения только внутренних столкновений границ модельных сфер. Введено понятие

соседства второго порядка. Для применения развитых положений в случае 3D-моделирования предложен и использован специальный метод триангуляции сферы.

Список литературы

1. Эластичные механизмы и конструкции [Текст] / В.И. Шихирин, В.Я. Ионова, О.В. Шальнев, В.И. Котляренко. – Иркутск : ИГТУ, 2006. – 286 с.
2. Бабичев, Д.А. Повышение эффективности и безопасности резервуарного хранения нефтей и нефтепродуктов путем использования гибких цилиндрических оболочек [Текст] / Д.А. Бабичев, Д.А. Земенкова / Нефтегазовое дело. – 2007. – С. 1 -18. - <http://www.ogbus.ru>
3. Берд, Г. Молекулярная газовая динамика [Текст] / Г. Берд.– М.: Мир, 1981. – 320 с.
4. Чернышев, Ю.К. Решение задач имитационного моделирования поведения большого количества модельных частиц [Текст]: учеб. пособ. / Ю.К. Чернышев – Х.: ХАИ, 2006. – 58 с.
5. Чернышев, Ю.К. Событийное программирование. Применение к решению некоторых задач физики. [Текст]: учеб. пособ. / Ю.К. Чернышев. – Х.: ХАИ, 2008. – 68 с. – <http://www.chernyshev.at.ua>

Рецензент: д-р техн. наук, профессор Соколов А.Ю., НАКУ им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

Поступила в редакцию 14.06.11

Подійне моделювання конструкцій, що містять в собі оболонки

Запропоновано метод комп'ютерного моделювання конструкцій, що містять в собі оболонки, шляхом подання як наповнювача, так і елементів оболонки у вигляді колективу твердих сфер. Для сусідніх частинок оболонки постулюється збереження властивості зв'язаності шляхом розгляду лише внутрішніх зіткнень меж модельних сфер. Введено поняття сусідства другого порядку. Події впорядковано за моментами часу, в яких вони можуть відбуватись. Досліджено процес зіткнень трубчастих конструкцій з стінкою та з перешкодами.

Ключові слова: подійне моделювання, еластичні оболонки, внутрішні й зовнішні відбиття.

An event-driven simulation of constructions containing shells

A method of computer simulation of constructions containing shells by presenting both the filler and shell elements in the form of collective hard spheres is proposed. For the neighboring particles of shell preservation properties of connectedness is postulated by considering only the internal clashes borders model spheres. The concept of neighborhood of the second order is introduced. Collision boundary spheres are considered as events. Events are ordered by increasing time points. The process of tubular structures collides with the wall and obstacles is considered.

Keywords: event-simulation, elastic shell, inside and outside repulsive