

УДК 004.89 : 531.31
DOI: 10.15827/0236-235X.139.444-451

Дата подачи статьи: 05.07.22
2022. Т. 35. № 3. С. 444–451

Компьютерное моделирование для интеллектуальной оценки динамического взаимодействия твердых тел

*В.В. Мешков*¹, д.т.н., профессор, декан машиностроительного факультета,
msf-tgtu@yandex.ru

*Н.Н. Филатова*¹, д.т.н., профессор кафедры информационных систем,
nfilatova99@mail.ru

*Ю.А. Федосов*², к.т.н., старший научный сотрудник

¹ Тверской государственный технический университет, г. Тверь, 170026, Россия

² Центральный научно-исследовательский институт Воздушно-космических сил Минобороны России, НИЦ, г. Тверь, 170026, Россия

В статье рассмотрена задача интегрирования результатов компьютерного моделирования с экспериментальными результатами динамического взаимодействия твердых тел с использованием цифровой обработки оптических и рентгеновских изображений для последующего анализа в информационной интеллектуальной системе.

Новизна заключается в способе оценки различий между результатами натурального и вычислительного экспериментов, основанного на использовании аппарата нечеткой логики и нечетких множеств, а также в процедуре перехода к индексной шкале при формировании общей оценки различий для множества точек соответствующих изображений. Предложена концепция и разработан алгоритм совместного кластерного анализа результатов рентгеновских и оптических исследований и результатов моделирования динамического взаимодействия тел.

Предложена верифицированная компьютерная модель оценки зоны динамического взаимодействия твердых тел. Обсуждены результаты моделирования гиперзвукового удара антропогенных частиц по модельным образцам и натурным элементам гибридной оболочки космического аппарата.

Компьютерная модель взаимодействия твердых тел позволяет изучать особенности сложных физических процессов, протекающих при ударе гиперзвуковой частицы в элемент космического аппарата, обосновывать состав и конструкцию реальных элементов космического аппарата и в определенных пределах прогнозировать его повреждение в зависимости от параметров элементов и антропогенных частиц. На основе результатов моделирования может быть сформирован банк данных, который расширит ограниченный набор результатов расчетно-экспериментального моделирования и натуральных экспериментов. В целом результаты компьютерного моделирования позволяют подготовить научно-обоснованные исходные данные и рекомендации для разработки конструкции защиты и системы управления защитой перспективных космических аппаратов.

Ключевые слова: информационная система, кластерный анализ, верификация, компьютерное моделирование, динамическое взаимодействие.

Значительная доля перспективной техники эксплуатируется в экстремальных условиях, в связи с этим возрастает роль изучения и оценки быстропротекающих процессов, в том числе динамического взаимодействия твердых тел при обеспечении функционирования летательных и космических аппаратов (КА).

Одной из актуальных проблем функционирования КА на низкой околоземной орбите является стойкость его элементов к повреждению при ударе антропогенными частицами, скорость которых может достигать нескольких км/с. Для изучения стойкости элементов КА к удару частиц используют экспериментальные и расчетные методы [1–3].

С целью повышения достоверности информации, используемой для повышения стойко-

сти элементов КА, представляет интерес оценка возможности объединения результатов компьютерного моделирования процесса и экспериментов для последующего анализа с использованием методов искусственного интеллекта. Объединение информации о сложных физических процессах, полученной с помощью разных инструментальных средств, может быть реализовано при создании *информационно-интегрированной системы моделирования* (ИИСМ) [4, 5].

Основная цель данной работы – интегрирование результатов компьютерного моделирования и экспериментальных исследований для последующей интеллектуальной оценки процесса динамического взаимодействия твердых тел.

Задачи исследования состоят в оценке различий цифровых экспериментальных рентгеновских и оптических изображений процесса и результатов моделирования процесса с помощью методов нечеткой логики, а также в разработке компьютерной модели для оценки параметров зоны гиперзвукового взаимодействия тела с элементами, в ее верификации и анализе результатов моделирования.

Основными функциями ИИСМ являются аккумуляция и анализ информации, полученной с помощью различных видов моделирования (расчетно-экспериментального и компьютерного), которые будут использоваться при формировании формализованных гипотез о взаимосвязи входных и выходных переменных [5]. В состав ИИСМ входят три программно-методических комплекса, каждый из которых имеет свою БД: ПМК-1, ориентированный на решение задач расчетно-экспериментального моделирования; ПМК-2, решающий задачи компьютерного моделирования в программных средах; ПМК-3, осуществляющий обработку, сравнение и анализ результатов расчета и прогнозирования, полученных в ПМК-1 и ПМК-2, с помощью алгоритмов нечеткой логики. Задачи обработки результатов экспериментов, полученных расчетно-экспериментальным и компьютерным моделированием, решаются в комплексе ПМК-3, в состав которого входят БД с векторными моделями, построенными по результатам расчетно-экспериментального и компьютерного моделирования, а также расчетные модули, позволяющие анализировать результаты натурального и вычислительного экспериментов.

В данной работе рассмотрены особенности компьютерного моделирования динамического взаимодействия тел в комплексе ПМК-2 с учетом экспериментальных данных. Программный комплекс ПМК-2 представляет собой информационную интегрированную систему компьютерного моделирования и содержит модули расчета параметров процессов динамического взаимодействия твердых тел, модуль анализа результатов импульсной рентгенографии, модуль верификации модели, генератор отчетов и модуль формирования обучающих выборок (рис. 1). Основное назначение информационной системы компьютерного моделирования заключается в объединении результатов моделирования в программной среде с результатами эксперимента и генерации структур знаний.

Важным параметром компьютерной модели является достоверность описываемого ею

сложного процесса динамического взаимодействия твердых тел.

Одной из главных целей совместного анализа результатов, полученных с помощью натурального и вычислительного экспериментов, является верификация компьютерной модели, реализуемой в программных средах. Моделирование взаимодействия твердых тел целесообразно осуществлять в программном продукте ANSYS, позволяющем решать сложные задачи нелинейной динамики [6, 7].

Для повышения достоверности результатов верификации компьютерных моделей сопоставляются форма и размеры облака частиц,

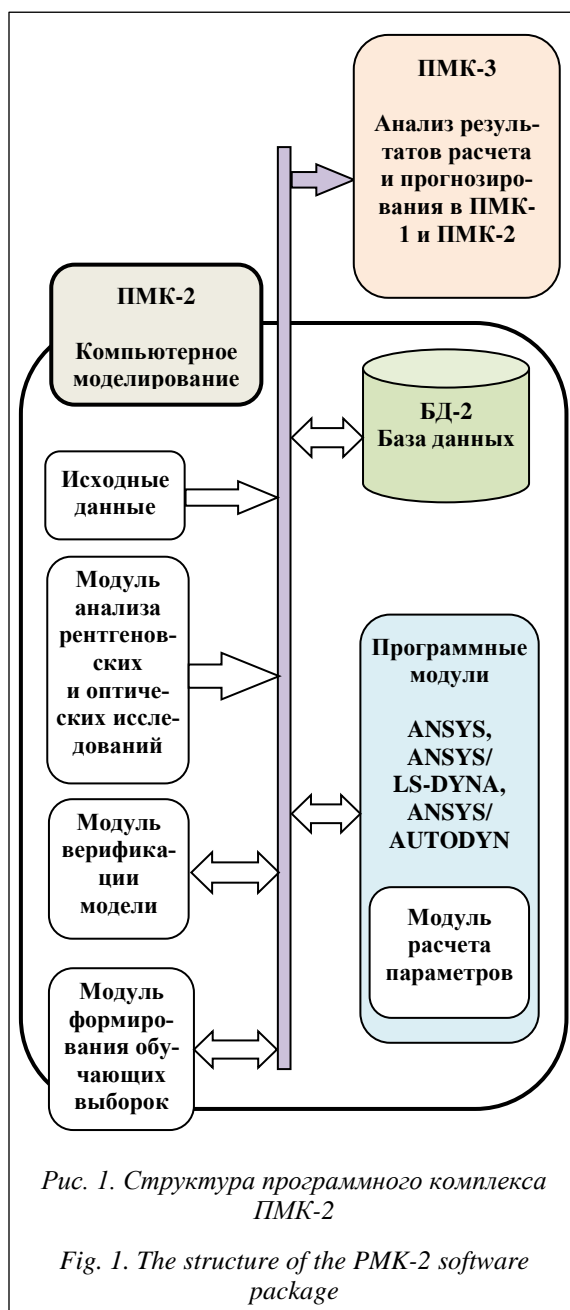


Рис. 1. Структура программного комплекса ПМК-2

Fig. 1. The structure of the PMK-2 software package

возникающего в процессе повреждения элементов и экранов, а также размеры и форма пробитых отверстий и повреждений, полученных экспериментально с помощью рентгеновского и оптического методов с количественными оценками этих параметров в компьютерной модели. Для оценки переменных величин использована лингвистическая шкала, включающая несколько нечетких значений [8–10].

Учитывая, что различия в результатах моделирования определяются с использованием множества точек соответствующих изображений, для формирования общей оценки использована процедура преобразования нечетких оценок в оценки по новой, так называемой индексной шкале [11]. Анализ показывает, что при переходе в индексную шкалу в числовом представлении сохраняется вся информация из лингвистической шкалы.

В качестве объекта анализа рассмотрена интегральная структура, объединяющая четыре элемента: $S = \langle R, F, D, T \rangle$, где S – сцена, ситуация; $R = \{R(t_j), R(t_k)\}$ – рентгеновские изображения, полученные в ходе натурального эксперимента; $F = \{F_Left, F_Right\}$ – оптические изображения двух проекций одного фрагмента сцены; D – диаграммы, иллюстрирующие поведение объектов на сцене, полученные при компьютерном моделировании; T – параметры, определяющие условия постановки эксперимента и результирующие характеристики.

Для обобщения результатов и выбора наиболее перспективных областей в пространстве T использованы методы кластерного анализа [12, 13], позволяющие автоматизировать процесс выделения признаков, которые можно использовать как основания классификации. В качестве инструментального средства использован пакет Statgraphics Plus [14], реализующий иерархические методы кластерного анализа. Для анализа экспериментальных данных рентгенографических и оптических исследований применены методы Nearest Neighbor [12] и Ward's method [13], а также общая формула оценки расстояния между отдельными объектами – евклидово расстояние.

Сформированные в ходе анализа специальные диаграммы (дендрограммы и скатерограммы) позволяют визуально оценить характер распределения экспериментов в многомерном пространстве признаков. Пакет Statgraphics Plus позволяет регулировать размерность признакового пространства и формировать различные варианты кластеризации.

Применение кластерного анализа позволило перейти к планированию вычислительных экспериментов с учетом выявленных областей в многомерном пространстве, которые представлены кластерами малой размерности или иллюстрируют большой разброс в оценках целевых показателей. Он позволяет получить количественные оценки для обоснования предпочтения признаков, автоматизировать процесс их выделения и классификации, а также обосновать стратегию планирования компьютерного моделирования динамического взаимодействия тел.

Сравнение размеров произвольных отверстий или повреждений в элементе, зарегистрированных оптическим методом (рис. 2) и полученных при компьютерном моделировании, производится в комплексе ПМК-3.

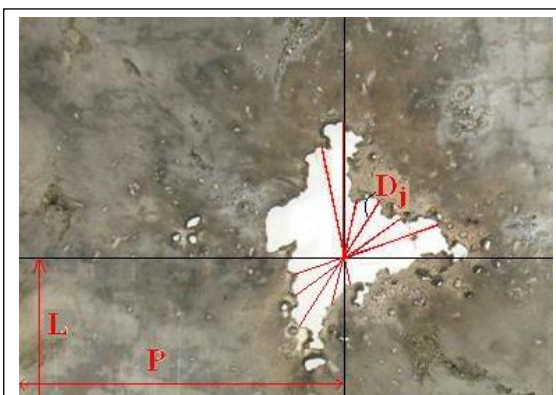


Рис. 2. Оптическое изображение элемента с пробитым отверстием сложной формы

Fig. 2. Optical image of an element with a punched complex shape hole

Для решения этой задачи используется новый алгоритм, основанный на нечетком логическом выводе. Основные этапы алгоритма сравнения параметров отверстий:

- приведение оптического изображения и изображения, полученного при компьютерном моделировании, к одному масштабу и формирование условной системы координат;
- оценка различий параметров отверстия для эксперимента и моделирования;
- выполнение процедуры фазификации, с помощью которой осуществляется переход к нечетким переменным;
- на основе анализа экспериментов с программой Fuzzy Logic Toolbox формулирование набора правил, с помощью которых делается качественная оценка различий отверстий, по-

лученных в эксперименте и при моделировании.

Окончательный результат оценки различия отверстий формируется путем логического вывода с помощью алгоритма Мамдани [8].

Рассмотрим особенности алгоритма анализа облака осколков на примере сравнения изображений на рентгенограмме и изображения, полученного при компьютерном моделировании (рис. 3).

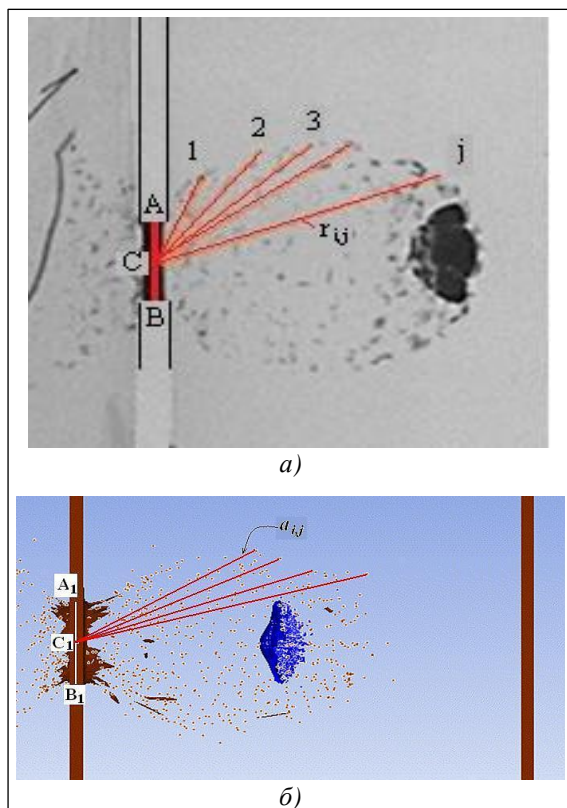


Рис. 3. Сравнение изображений облака частиц при динамическом взаимодействии твердых тел, полученных а) методом рентгеновского анализа, б) путем компьютерного моделирования

Fig. 3. Comparing images of a cloud of particles during the dynamic interaction of solid bodies a) obtained by X-ray analysis, б) by computer simulation

Вследствие отсутствия четких границ изображений рентгеновских снимков использован аппарат нечетких множеств [8]. Контуры рентгеновского (R_i) и компьютерного (A_i) изображений приводятся к единому масштабу. Контур R_i разбивается метками на одинаковые сегменты ($j = 1, 2, \dots, m$). Каждая метка соединяется с центром пробитого отверстия (C). Таким образом, получаем множество векторов

$\{r_{i,j}\}$, выходящих из общей точки C и покрывающих весь контур анализируемой фигуры. Совместив контуры R_i и A_i в точках $C = C_1$, можно получить соответствующее разбиение контура A_i на m сегментов и соответствующее множество векторов $\{a_{i,j}\}$. Сумма индексных оценок на множестве принята за общую оценку различия в размерах и форме двух анализируемых изображений.

Для анализа сравнения изображений использован следующий алгоритм:

- построение векторной сегментной диаграммы точек облака осколков в сечении в едином масштабе при одинаковых фиксированных значениях времени и пространственных координат;

- формирование множества индексных оценок, сумма которых принята за общую оценку различия в размерах и форме двух анализируемых изображений, при выполнении процедуры фазификации и переходе к индексной шкале;

- формулирование в программе основных правил оценки различия в размерах и форме изображений облака частиц.

В целом анализ результатов сравнения параметров экспериментальных оптических, рентгеновских и компьютерных изображений позволяет сделать вывод об удовлетворительном соответствии параметров сравниваемых изображений и возможности использования этой методики для описания динамического взаимодействия твердых тел.

Новизну представляет способ оценки различия между результатами натурального и вычислительного экспериментов, выполненных с использованием одинакового набора исходных данных. Способ основан на использовании аппарата нечетких множеств и нечеткой логики. Главное преимущество нечетких алгоритмов связано с переходом от количественных данных (оценки физических переменных по базовой шкале) к лингвистическим переменным. Интерпретация результатов исследования с использованием лингвистических переменных позволяет создавать структуры знаний, которые в дальнейшем будут востребованы при создании интеллектуальных систем анализа результатов моделирования.

Таким образом, предложена концепция и разработан алгоритм совместного кластерного анализа результатов рентгеноимпульсных и оптических исследований, а также результатов компьютерного моделирования динамического взаимодействия твердых тел. Анализ позволяет

получить количественные оценки для обоснования предпочтения признаков, автоматизировать процесс их выделения и классификации, а также обосновать стратегию планирования моделирования.

Динамическое взаимодействие твердых тел в условиях нестационарной нелинейной динамики характеризуется рядом параметров, изменяющихся во времени: высокой скоростью процессов, превышающей скорость распространения в телах упругих волн; сложным напряженно-деформированным состоянием тел; существенным изменением свойств материалов в зависимости от скорости деформации и температуры; подвижными границами контакта; фазовыми переходами и другими.

Для описания процесса динамического взаимодействия твердых тел использована известная модель сжимаемого упругопластического тела [1–3]. Основные соотношения, описывающие движение сжимаемой упругопластической среды, базируются на законах сохранения массы, импульса и энергии и замыкаются соотношениями Прандтля–Рейсса с учетом условия текучести Мизеса.

Для оценки взаимодействия тел по математической модели на основе определяющего уравнения Купера–Саймондса в программных средах ANSYS/LS-DYNA и ANSYS/AUTODYN использован метод конечных элементов.

Алгоритм вычислений в модели следующий:

- определение координат нового расположения каждого узла с учетом узловых скоростей с интегрированием по времени внутри шага;
- расчет плотности новых элементов и скорости деформации элементов, напряжений, деформаций, гидростатических напряжений, полей девиаторных напряжений, узловых сил на основе внутренних напряжений в элементе;
- приложение граничных условий и контактных сил к узлам;
- повторение процедуры до достижения заданного времени или предельного цикла.

В качестве модели разрушения и пластичности принята модель Джонсона–Кука, в которой динамический предел текучести варьируется в зависимости от деформации, скорости деформации и температуры, модель ударной адиабаты (ShockEOS) и осколочная модель разрушения Грэйди (GradySpall).

Как критерий разрушения используется сопряженная модель на базе кумулятивного закона накопления поврежденности, учитывающая исходные условия и условия разрушения в зависи-

мости от температуры, скорости нагружения, прочностных свойств материалов и других факторов.

Для решения задач динамического взаимодействия твердых тел использован метод Лагранжа, выражающий дифференциальные уравнения сохранения массы, импульса и энергии процесса динамического взаимодействия твердых тел в лагранжевых координатах. При описании разрушения материала использована близкая к известному методу SPH функция эрозии конечных элементов с сохранением инерции, что предполагает моделирование процесса разрушения фрагмента материала на более мелкие частицы [15, 16].

Для описания контактного взаимодействия тел использована модель Trajectory, характеризующая относительную скорость поверхностей контакта и скорость изменения коэффициента трения.

Верификация модели проведена на основе серии экспериментов (более 100) для ряда модельных систем и натуральных образцов КА. Так, для системы разнесенных металлических и композитных слоистых стенок (на основе углепластика и алюминиевого или титанового сплавов) она показала удовлетворительное совпадение с экспериментальными данными: различие составило от 6,7 % до 21,3 % в зависимости от параметров динамического взаимодействия. Верифицированная модель позволяет изучать кинетику и стадии пробития стенок, разрушения ударного элемента и образования облака осколков при гиперзвуковом ударе, что является важным аспектом фундаментальной научной проблемы изучения механизма динамического взаимодействия твердых тел.

Наблюдаются деформация частицы и образование облака осколков из материалов стенок и частицы. Анализ кинетики этого процесса позволил сделать выводы:

- о существенных различиях в параметрах и механизме разрушения как металлических и композитных разнесенных преград, так и твердой частицы;
- о различиях в кинетике изменения кинетической энергии системы стенки – тело для разнесенных стенок: металлических и композитных (из углепластика и металла); увеличение скорости удара приводит к увеличению объема разрушений в стенках; наличие слоя углепластика, наоборот, способствует снижению разрушения частицы тела в процессе пробития и после пробития стенок.

На рисунке 4 в программной среде ANSYS/AUTODYN представлены фрагменты оценки

кинетики возникновения и распространения эквивалентных напряжений в теле и гибридном натурном элементе обшивки КА, представляющей собой конструкцию из последовательно расположенных двух слоев стеклопластика и армирующего слоя из алюминиевого сплава.

При увеличении скорости удара антропогенной частицы, моделируемой сферическим телом виз сплава ШХ15, максимальные эквивалентные напряжения в ударяющем теле достигают $\sigma_{\text{экв}} = 5\ 000$ МПа, что в 2–3 раза превышает прочность сплава ШХ15 (рис. 4а). В результате происходит его интенсивное разрушение, начиная со второго слоя стеклопластика, путем дробления и образования облака с большим количеством осколков. Этот процесс интенсифицируется с ужесточением параметров взаимодействия, например, с увеличением скорости взаимодействия (рис. 4б).

При этом возникают температурные поля, которые изменяются в зависимости от параметров взаимодействия, например, максимальная температура тела может достигать $700\ ^\circ\text{C}$ и выше. Анализ результатов показал, что температурный фактор оказывает существенное влияние на деформирование и разрушение тела.

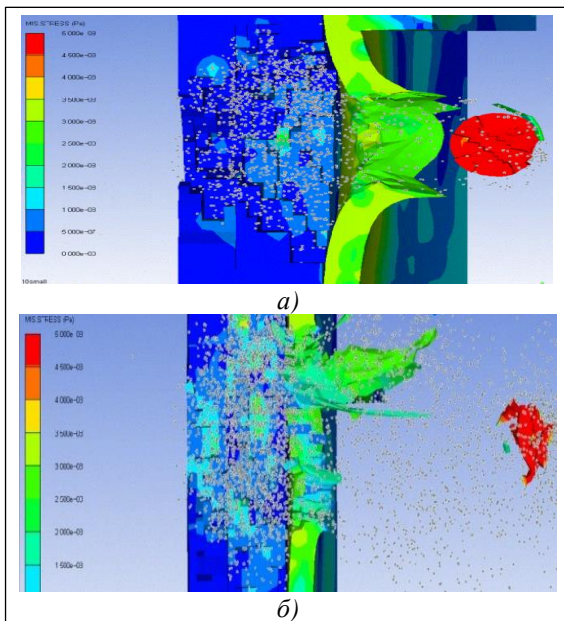


Рис. 4. Кинетика возникновения и распространения эквивалентных напряжений в теле из сплава ШХ15 и элементе КА при скоростях взаимодействия: а) $V=1465$ м/с, б) $V=2961$ м/с

Fig. 4. Kinetics of the emergence and propagation of equivalent stresses in a ShKh15 alloy body and the spacecraft element at interaction velocities: а) $V=1465$ m/s, б) $V=2961$ m/s

Изучение особенностей сложных физических процессов, протекающих при ударе гиперзвуковой частицы в элемент КА, позволяет обосновать состав и конструкцию реальных элементов КА и в определенных пределах прогнозировать повреждение КА в зависимости от изменения материала, размеров и скорости антропогенных частиц и сформировать банк данных, который может уточняться и дополняться новыми данными.

Компьютерное моделирование позволяет также расширить ограниченный набор результатов расчетно-экспериментального моделирования и натуральных экспериментов. В свою очередь, это позволяет разработать основы использования банка данных при создании защиты и систем управления защитой перспективных КА.

Заключение

В рамках информационной интегрированной интеллектуальной системы разработана структура и описаны функции программно-методического комплекса для компьютерного моделирования динамического взаимодействия твердых тел.

Предложены способ оценки различий между результатами натурального и вычислительного экспериментов, основанный на использовании аппарата нечеткой логики и нечетких множеств, а также оригинальная процедура перехода к индексной шкале при формировании общей оценки различий для множества точек соответствующих изображений. Применение аппарата нечеткой логики позволяет формировать обобщающие высказывания с оценками результатов моделирования, переходить от структур данных к структурам знаний, то есть к интеллектуальным технологиям анализа результатов экспериментов. Результаты могут быть использованы для разработки теоретических и прикладных основ построения интеллектуальной системы управления защитой перспективных КА от ударов антропогенных частиц.

В программной среде ANSYS в лагранжевой постановке на основе уравнений состояния, прочности и разрушения с применением опции сохранения импульса и учета контактных процессов разработана верифицированная компьютерная модель для оценки параметров зоны динамического взаимодействия твердых тел. Компьютерная модель может быть использована для изучения фундаментальных основ

динамического взаимодействия тел, а также для оценки и прогнозирования последствий динамического воздействия частиц в диапазоне

скоростей и масс, недоступных в экспериментах, и проектирования перспективных систем защиты различных объектов, в том числе КА.

Литература

1. Герасимов А.В., Барашков В.Н., Глазырин В.П., Коняев А.А. и др. Теоретические и экспериментальные исследования высокоскоростного взаимодействия тел. Томск: Изд-во Томского ун-та, 2007. 572 с.
2. Schonberg W.P. Studies of hypervelocity impact phenomena as applied to the protection of spacecraft operating in the MMOD environment. *Procedia Engineering*, 2017, vol. 204, pp. 4–42. DOI: 10.1016/J.PROENG.2017.09.723.
3. Smirnov N.N., Kiselev A.B., Kondratyev K.A., Zolkin S.N. Impact of debris particles on space structures modeling. *Acta Astronautica*, 2010, vol. 67, no. 3, pp. 333–343. DOI: 10.1016/j.actaastro.2010.03.003.
4. Palyukh B.V., Meshkov V.V., Kemaykin V.K., Kozlova Yu.G. Fundamentals of intelligent system for estimation of dynamical interaction of space debris with spacecrafts. In: AISC, 2017, vol. 658, pp. 248–257. DOI: 10.1007/978-3-319-67349-3_23.
5. Meshkov V.V., Fedosov Yu.A., Filatova N.N. An integrated system for modeling hypervelocity interaction of solids. *Acta Astronautica*, 2021, vol. 178, pp. 606–615. DOI: 10.1016/J.ACTAASTRO.2020.09.047.
6. ANSYS/LS-DYNA User's Guide. 2011, 247 p. URL: https://bajatutor.net/wp-content/uploads/2017/04/ans_lsd.pdf (дата обращения: 14.05.2022).
7. LS-DYNA Theory Manual. 2006, 884 p. URL: <https://lsdyna.ru/wp-content/uploads/2018/10/LS-DYNA-Theory-Manual.pdf> (дата обращения: 14.05.2022).
8. Zimmermann H.-J. *Fuzzy Set Theory and Its Applications*. NY, Springer Dordrecht Publ., 2001, 315 p. DOI: 10.1007/978-94-010-0646-0.
9. Palyukh B.V., Kemaykin V.K., Kozlova Yu.G., Kozhukhin I.V. Forecasting of results of dynamic interaction between space debris and spacecrafts on the basis of soft computing methods. *Proc. III Int. Sci. Conf. ITI, AISC*, 2019, pp. 293–302. DOI: 10.1007/978-3-030-01818-4_29.
10. Amza C.G., Cicic D.T. Industrial image processing using fuzzy-logic. *Procedia Engineering*, 2015, vol. 100, pp. 492–498. DOI: 10.1016/J.PROENG.2015.01.404.
11. Миловидов А.А., Филатова Н.Н. Программный комплекс для лингвистической интерпретации графических зависимостей с нечеткими координатами // Программные продукты и системы. 2011. № 3. С. 110–114.
12. Kaufman L., Rousseeuw P.J. Finding groups in data: an introduction to cluster analysis. *Biometrics*, 1991, vol. 47, no. 2, p. 788. DOI: 10.2307/2532178.
13. Everitt B.S., Landau S., Leese M. *Cluster Analysis*. London, John Wiley Publ., 2011, 357 p. DOI: 10.1002/9780470977811.
14. Пен Р. Планирование эксперимента в Statgraphics Centurion; [пер. с англ.]. Красноярск: Изд-во Сибирского гос. технологического ун-та, 2014. 291 с.
15. Liu M.B., Liu G.R. Smoothed particle hydrodynamics (SPH): An overview and recent developments. *Arch. Comput. Methods Eng.*, 2010, vol. 17, pp. 25–76. DOI: 10.1007/S11831-010-9040-7.
16. Зеленцов В.В., Маханьков А.В. Численное моделирование методом SPH взаимодействия фрагментов космического мусора с элементами конструкций космических аппаратов // Наука и Образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2017. № 05. С. 42–56. DOI: 10.7463/0517.0001164.

Software & Systems
DOI: 10.15827/0236-235X.139.444-451

Received 05.07.22
2022, vol. 35, no. 3, pp. 444–451

Computer modeling for intelligent evaluation of dynamic interaction of solids

V.V. Meshkov¹, *Dr.Sc. (Engineering), Professor, Dean of Mechanical Engineering Department, msf-tgtu@yandex.ru*

N.N. Filatova¹, *Dr.Sc. (Engineering), Professor of Information Systems Chair, nfilatova99@mail.ru*

Yu.A. Fedosov², *Ph.D. (Engineering), Senior Researcher*

¹ *Tver State Technical University, Tver, 170026, Russian Federation*

² *Tver Research Center of Central Science Research Institute of Aerospace Forces of the Ministry of Defense of Russia, Tver, 170026, Russian Federation*

Abstract. The paper considers the problem of integrating the computer modeling results with experimental results of dynamic interaction of solids using digital processing of optical and X-ray images for subsequent analysis in an information intelligent system.

The novelty is in the method of assessing the differences between the results of field and computational experiments based on use the fuzzy logic and fuzzy sets, as well as the procedure of switching to an index scale when

forming a general assessment of differences for a set of the corresponding image points. The authors propose a concept and a developed algorithm for the joint cluster analysis of the results of X-ray and optical studies and the results of modeling the dynamic interaction of bodies.

A computer model of solids interaction makes it possible to study the features of complex physical processes that occur when a hypersonic particle hits a spacecraft element, to substantiate the composition and design of real spacecraft elements, and to predict its damage depending on the parameters of elements and anthropogenic particles within certain limits. The simulation results can become a base for forming a data bank that will expand the limited set of results of computational and experimental modeling and field experiments. In general, the computer simulation results make it possible to prepare scientifically based initial data and recommendations for developing a protection design and a protection control system for an advanced spacecraft.

Keywords: information system, cluster analysis, verification, computer modeling, dynamic interaction.

References

1. Gerasimov A.V., Barashkov V.N., Glazyrin V.P., Konyaev A.A. et al. *Theoretical and Experimental Study of High-speed Interaction of Bodies*. Tomsk, 2007, 572 p. (in Russ.).
2. Schonberg W.P. Studies of hypervelocity impact phenomena as applied to the protection of spacecraft operating in the MMOD environment. *Procedia Engineering*, 2017, vol. 204, pp. 4–42. DOI: 10.1016/J.PROENG.2017.09.723.
3. Smirnov N.N., Kiselev A.B., Kondratyev K.A., Zolkin S.N. Impact of debris particles on space structures modeling. *Acta Astronautica*, 2010, vol. 67, no. 3, pp. 333–343. DOI: 10.1016/j.actaastro.2010.03.003.
4. Palyukh B.V., Meshkov V.V., Kemaykin V.K., Kozlova Yu.G. Fundamentals of intelligent system for estimation of dynamical interaction of space debris with spacecrafts. In: *AISC*, 2017, vol. 658, pp. 248–257. DOI: 10.1007/978-3-319-67349-3_23.
5. Meshkov V.V., Fedosov Yu.A., Filatova N.N. An integrated system for modeling hypervelocity interaction of solids. *Acta Astronautica*, 2021, vol. 178, pp. 606–615. DOI: 10.1016/J.ACTAASTRO.2020.09.047.
6. *ANSYS/LS-DYNA User's Guide*. 2011, 247 p. Available at: https://bajatutor.net/wp-content/uploads/2017/04/ans_lsd.pdf (accessed May 05, 2022).
7. *LS-DYNA Theory Manual*. 2006, 884 p. Available at: <https://lsdyna.ru/wp-content/uploads/2018/10/LS-DYNA-Theory-Manual.pdf> (accessed May 05, 2022).
8. Zimmermann H.-J. *Fuzzy Set Theory and Its Applications*. NY, Springer Dordrecht Publ., 2001, 315 p. DOI: 10.1007/978-94-010-0646-0.
9. Palyukh B.V., Kemaykin V.K., Kozlova Yu.G., Kozhukhin I.V. Forecasting of results of dynamic interaction between space debris and spacecrafts on the basis of soft computing methods. *Proc. III Int. Sci. Conf. IITI, AISC*, 2019, pp. 293–302. DOI: 10.1007/978-3-030-01818-4_29.
10. Amza C.G., Cicic D.T. Industrial image processing using fuzzy-logic. *Procedia Engineering*, 2015, vol. 100, pp. 492–498. DOI: 10.1016/J.PROENG.2015.01.404.
11. Milovidov A.A., Filatova N.N. A software package for linguistic interpretation of graphical dependencies with fuzzy coordinates. *Software & Systems*, 2011, no. 3, pp. 110–114 (in Russ.).
12. Kaufman L., Rousseeuw P.J. Finding groups in data: an introduction to cluster analysis. *Biometrics*, 1991, vol. 47, no. 2, p. 788. DOI: 10.2307/2532178.
13. Everitt B.S., Landau S., Leese M. *Cluster Analysis*. London, John Wiley Publ., 2011, 357 p. DOI: 10.1002/9780470977811.
14. Pen P. *Experiment Planning: Implementation in Statgraphics Environment*. Lap Lambert Academic Publ., 2014, 355 p. (Russ. ed.: Krasnoyarsk, 2014, 291 p.).
15. Liu M.B., Liu G.R. Smoothed particle hydrodynamics (SPH): An overview and recent developments. *Arch. Comput. Methods Eng.*, 2010, vol. 17, pp. 25–76. DOI: 10.1007/S11831-010-9040-7.
16. Zelentsov V.V., Makhankov A.V. A SPH method-based numerical simulation of the space debris fragments interaction with spacecraft structure components. *Science and Education of the Bauman MSTU*, 2017, no. 05, pp. 42–56. DOI: 10.7463/0517.0001164. (in Russ.).

Для цитирования

Мешков В.В., Филатова Н.Н., Федосов Ю.А. Компьютерное моделирование для интеллектуальной оценки динамического взаимодействия твердых тел // Программные продукты и системы. 2022. Т. 35. № 3. С. 444–451. DOI: 10.15827/0236-235X.139.444-451.

For citation

Meshkov V.V., Filatova N.N., Fedosov Yu.A. Computer modeling for intelligent evaluation of dynamic interaction of solids. *Software & Systems*, 2022, vol. 35, no. 3, pp. 444–451 (in Russ.). DOI: 10.15827/0236-235X.139.444-451.