УДК 004.89

ФОРМИРОВАНИЕ РАБОЧЕЙ ВЫБОРКИ ДЛЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ*

В.В. МЕШКОВ, д-р техн. наук, Н.Н. ФИЛАТОВА, д-р техн. наук,
В.К. КЕМАЙКИН, канд. техн. наук

Тверской государственный технический университет,
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: msf-tgtu@yandex.ru

© Мешков В.В., Филатова Н.Н., Кемайкин В.К., 2023

Рассмотрена возможность объединения результатов проведенных экспериментов, зафиксированных цифровыми средствами оптического и рентгенографического наблюдения с верифицированной компьютерной моделью высокоскоростного взаимодействия твердых тел для подготовки исходных данных построения интеллектуальной системы управления защитой автономного объекта, на примере космического аппарата. Разработан способ, позволяющий оценивать степень соответствия результатов натурного и машинного экспериментов с использованием теории нечетких множеств и аппарата нечеткой логики. Для оценки модели проведена верификация результатов компьютерного моделирования характеристик зоны взаимодействия твердых тел высокоскоростного удара антропогенных частиц для типовых образцов материалов оболочки и элементов конструкции космического аппарата.

Ключевые слова: интеллектуальная система, прецедент, кластерный анализ, верификация, компьютерное моделирование, рабочая выборка.

DOI: 10.46573/2658-5030-2023-1-103-111

ВВЕДЕНИЕ

Значительная доля современных сложных технических систем эксплуатируется в автономных режимах и условиях невозможности оперативного управления функционированием. В связи с этим возрастает значение внедрения технологий «разумной автоматизации», реализованных в интеллектуальных системах управления [1, 2]. Для построения таких систем требуется наличие большого объема исходных данных, отражающих результаты многофакторных и быстропротекающих процессов воздействия внешних механических угроз, одним из примеров которого являются удары антропогенных частиц (АЧ) по космическим аппаратам (КА) длительного орбитального функционирования.

Для получения данных о защищенности КА от воздействия АЧ, летящих с космическими скоростями, активно используются экспериментальные и расчетные методы [3–6], которые позволяют формировать ограниченный набор прецедентов.

*Материалы были представлены на научном семинаре «Золотовские чтения», посвященном 100-летию со дня рождения выдающегося российского математика, академика АН СССР Золотова Евгения Васильевича (6–7 октября 2022, Тверь, Тверской государственный технический университет).

Увеличение объема достоверной информации, применяемой при принятии решений по управлению защитой КА, может быть обеспечено на базе объединения результатов компьютерного моделирования, экспериментальных исследований и формирования на их основе рабочей выборки интеллектуальной системы требуемого объема.

Рабочая выборка должна включать в себя:

обучающую – определена, как следует из названия, для обучения (настройки) модели;

тестовую – предназначена для оценки качества работы модели и должна быть полностью независимой от обучающей. Она обеспечивает несмещенность оценок модели (их смещенность вызывается переобучением);

валидационную – используется для подбора параметров, выбора признаков и других решений по алгоритму.

Объединение информации о сложных физических процессах, полученной с помощью разных инструментальных средств, позволит формировать любое количество прецедетов, необходимых для построения, обучения и поддержания интеллектуальной системы управления в актуальном состоянии.

Цель работы – разработка метода совместного использования результатов компьютерного моделирования и экспериментальных исследований процесса динамического взаимодействия твердых тел для формирования рабочей выборки и ее последующего использования в технологии построения интеллектуальной системы управления защитой КА от ударов АЧ.

Задачи исследования:

создание алгоритма сравнительного анализа рентгеновских и оптических цифровых изображений, полученных в ходе эксперимента, и результатов моделирования процесса методом нечеткой логики;

построение компьютерной модели прогнозирования характеристик зоны высокоскоростного гиперзвукового удара АЧ и ее верификация;

формирование рабочей выборки для построения интеллектуальной системы управления.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Основными функциями рабочей выборки является подготовка исходных данных, а также результатов различных видов моделирования (расчетно-экспериментального и компьютерного), которые будут использоваться при формировании формализованных гипотез о взаимосвязи входных и выходных переменных в задаче управления защитой КА [7].

Рабочая выборка создается в ходе работы трех программно-методических комплексов. Каждый из этих комплексов имеет свою базу данных:

ПМК-1 – комплекс расчетно-экспериментальных моделей;

ПМК-2 – комплекс компьютерного моделирования в программных средах;

ПМК-3 – комплекс совместной обработки и анализа результатов расчета и прогнозирования результатов, полученных в ПМК-1 и ПМК-2.

Обработка результатов в ПМК-3 проводится с помощью векторных моделей, построенных на основе результатов расчетно-экспериментального и компьютерного моделирования и расчетных модулей, дающих возможность провести анализ результатов натурного и вычислительного экспериментов.

В работе рассмотрены особенности компьютерного моделирования динамического взаимодействия тел в комплексе ПМК-2 с учетом экспериментальных данных. ПМК-2 представляет собой систему компьютерного моделирования, в состав

которой входят модуль расчета характеристик высокоскоростного удара АЧ; модуль анализа результатов цифровой рентгенографии и визуальных изображений; модуль верификации модели; генератор отчетов; модуль формирования рабочей выборки (рис. 1).

Рис. 1. Структурная схема ПМК-2

Задача, решаемая в интегрированной среде компьютерного моделирования, заключается в объединении результатов моделирования программными средствами с результатами эксперимента для формирования рабочей выборки требуемой структуры и объема.

Важными параметрами компьютерной модели являются адекватность описываемого ею сложного процесса и достоверность получаемых при моделировании результатов динамического взаимодействия твердых тел.

Совместный анализ результатов, полученных в ходе натурного и вычислительных экспериментов, проводился с целью верификации компьютерной модели, реализуемой в программных средах. Для моделирования взаимодействия

твердых тел выбрано современное программное средство инженерного анализа и численного моделирования ANSYS, позволяющее решать сложные задачи нелинейной динамики [8, 9].

Верификация компьютерных моделей осуществлялась на основе сопоставления параметров облака частиц, возникающего в процессе повреждения элементов и экранов, а также размеров и формы пробитых отверстий и повреждений (информация об указанных размерах и форме была получена экспериментально, с помощью рентгеновского и оптического методов) через количественную оценку этих параметров в компьютерной модели [4]. Оценка переменных величин включает в себя операции теории нечетких чисел. В ходе оценки были использованы лингвистические переменные с ограниченным терм-множеством значений [9–11].

С целью формирования общей оценки была проведена процедура преобразования нечетких оценок в оценки по новой (так называемой индексной) шкале [12].

Переход от нечетких чисел к индексной шкале обеспечивает сохранение информации лингвистических оценок и семантическую устойчивость вывода.

В качестве объекта анализа (S – сцена, ситуация) рассмотрена интегральная структура, объединяющая четыре элемента:

$$S = \langle R, F, R, D, T \rangle,$$

где $R = \{(R(t_j), R(t_k)\}$ – рентгеновские изображения, полученные в ходе натурного эксперимента; F = {F_Left, F_Right} – оптические изображения двух проекций одного фрагмента сцены; D – диаграммы, иллюстрирующие поведение объектов и полученные во время компьютерного моделирования; T – параметры, определяющие условия постановки эксперимента и результирующие характеристики.

Выбор условия постановки эксперимента и характеристик (признаков) T наиболее перспективных областей в пространстве проводился с помощью методов кластерного анализа [13, 14]. В качестве инструментального средства был применен пакет STATGRAPHICS Plus [15], реализующий иерархические методы кластерного анализа. Анализ полученных рентгенографических и оптических изображений осуществлялся с использованием методов Nearest Neighbor [13] и Ward'smethod [14], а также расчета метрики – евклидового расстояния между объектами.

Результаты иерархической кластеризации, представленные в виде специальных диаграмм (дендро- и скатерограммы), определяют плотность проводимых экспериментов в многомерном пространстве признаков. Функционал пакета STATGRAPHICS Plus дает возможность управлять размерностью признакового пространства и формировать требуемые варианты для кластеризации.

Применение кластерного анализа позволяет определить области многофакторного пространства, которые включают кластеры малой размерности или имеют большие разбросы оцениваемых параметров. Его использование обеспечило:

решение задач оценки и обоснования признакового пространства,

ранжирование характеристик,

планирование проведения вычислительных экспериментов.

Анализ результатов проведенного эксперимента, зарегистрированных оптическим методом (рис. 2) и полученных при компьютерном моделировании, осуществлялся с помощью комплекса ПМК-3.

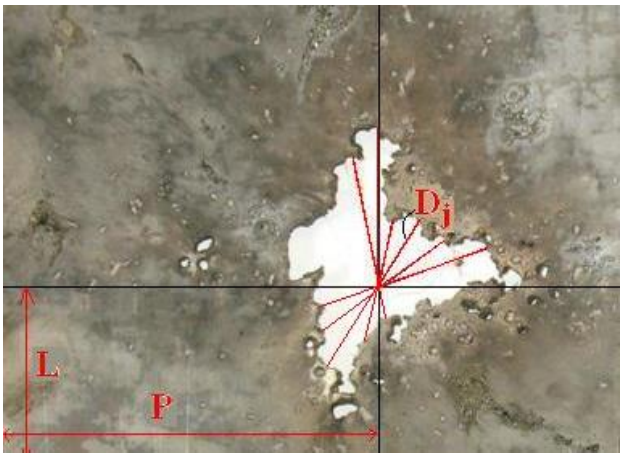


Рис. 2. Регистрация результатов эксперимента методом оптического наблюдения

Результат сравнивались на основе решения нечетких логических уравнений по следующему алгоритму:

1) нормализация размеров оптического изображения и изображения, полученного при компьютерном моделировании, и приведение их к единому масштабу в связанной системе координат;

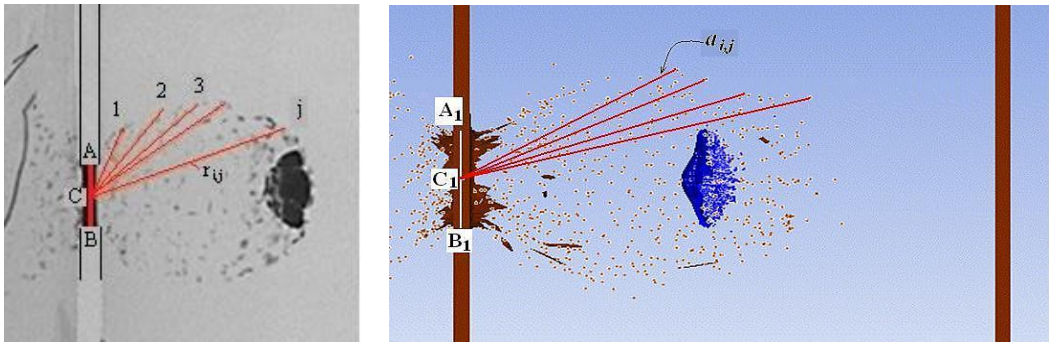
2) метрическая оценка отклонения параметров повреждения для эксперимента и моделирования;

3) представление полученных значений отклонений в виде нечетких чисел;

4) формирование набора нечетких логических высказываний по качественной оценке различий и построение на их основе нечетких логических уравнений; оценка различий отверстий, полученных в эксперименте и при моделировании [3];

5) реализация нечеткого логического вывода в среде Fuzzy Logic Toolbox для получения оценки различия рассматриваемых результатов [10].

Работу алгоритма сравнения результатов, полученных на рентгенограмме и в ходе компьютерном моделирования, рассмотрим на примере регистрации облака осколков при взаимодействии твердых тел (рис. 3).



(а) (б)

Рис. 3. Результаты взаимодействия твердых тел,
полученные методом рентгеновского анализа (а) и компьютерного моделирования (б)

Приведенные результаты взаимодействия отражают условия реализованного эксперимента, включают в себя элемент случайности (неопределенности) и, как следствие, характеризуются нечеткостью границ изображения удара на рентгеновских снимках [10].

На первом этапе определялись контуры компьютерного A_i и рентгеновского R_i изображений, что позволит в дальнейшем провести нормализацию параметров повреждения в едином масштабе. Для этого площадь, ограниченную контуром R_i, разбивали на одинаковые сегменты (j = 1, 2, … m) с началом в центре пробитого отверстия (C). Полученное множество векторов $\{r_{i,j}\}$, выходящих из единого начала отсчета и покрывающих контур анализируемой фигуры, явилось исходным описанием зарегистрированного облака осколков. В дальнейшем, наложив контуры R_i и A_i и совместив центр пробитого отверстия, получили соответствующее разбиение для контура A_i. Оно также включает m сегментов и набор векторов $\{a_{i,j}\}$. Результирующей оценкой различия размеров и форм двух изображений выступила сумма индексных оценок на множестве разбиения.

Результаты экспериментальных и компьютерных изображений позволили сделать вывод о достаточном соответствии параметров изображений и возможности использования метода для адекватного описания результатов взаимодействия АЧ и КА.

Новизна метода состоит в разработанном механизме оценки различий между результатами натурного и вычислительного экспериментов, основанных на использовании аппарата нечетких множеств и нечеткой логики. Алгоритмы нечеткой логики позволяют учитывать неопределенность выходных параметров, представленных оценками физических характеристик по базовой шкале, путем представления их в виде нечетких значений лингвистических переменных. Интерпретация результатов исследования с помощью лингвистических переменных формирует структуры знаний, которые позволят проводить интеллектуальный анализ результатов моделирования при формировании рабочей выборки [4].

Отличительными признаками, определяющими результаты ударов АЧ по КА, являются высокая (по сравнению со скоростью распространения в упругих телах) скорость волн; сложный характер напряженно-деформированного состояния тел; изменения свойств материалов вследствие деформации и высокой температуры; неустойчивые границы контакта; сложные фазовые переходы и др. [2].

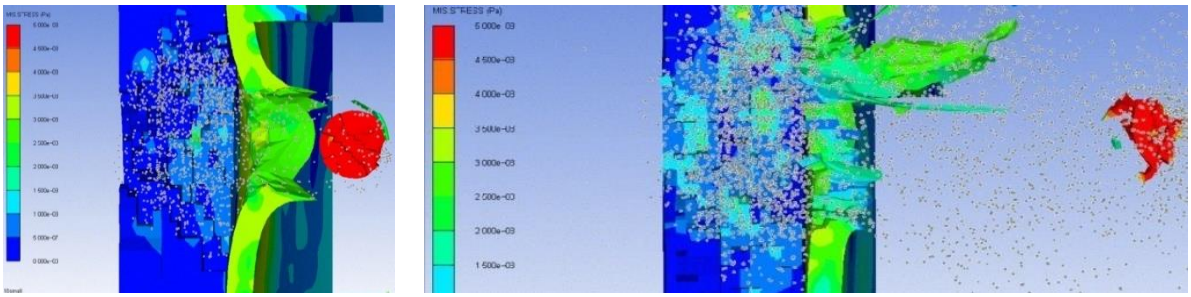
Моделирование процесса основано на известной зависимости сжимаемого упругопластического тела [3–6, 8, 9]. Содержанием указанной модели является формализация сжатия упругопластической среды, базирующаяся на законах сохранения массы, импульса и энергии и соотношениями Прандтля – Рейсса (Prandtl-Reuss), с учетом условия текучести Мизеса.

Для получения результатов и оценки взаимодействия построена математическая модель уравнения Купера – Саймондса, реализованная в среде ANSYS/LS-DYNA и ANSYS/AUTODYN [6, 7] с помощью метода конечных элементов [4].

Верификация модели проведена на основе серии экспериментов (> 100) для ряда модельных систем и натурных 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 высокоскоростном ударе, что является важным аспектом фундаментальной научной проблемы изучения механизма динамического взаимодействия твердых тел.

На рис. 4 показаны в программной среде ANSYS/AUTODYN фрагменты оценки кинетики возникновения и распространения эквивалентных напряжений в

теле и гибридном натурном элементе обшивки КА, представляющем собой конструкцию из последовательно расположенных двух слоев стеклопластика и армирующего слоя из алюминиевого сплава.



(а) (б)

Рис. 4. Кинетика возникновения и распространения эквивалентных напряжений в теле из сплава ШХ15 и элементе КА при скоростях взаимодействия V = 1 465 м/с (а) и V = 2 961 м/с (б) [4]

При возрастании скорости удара АЧ, моделируемой сферическим телом из сплава ШХ15, максимальные эквивалентные напряжения в ударяющем теле достигают 5 000 МПа, что в 2…3 раза превышает прочность сплава ШХ15 (см. рис. 4а). В результате происходит интенсивное разрушение тела со второго слоя стеклопластика путем дробления и образования облака с большим количеством осколков. Этот процесс интенсифицируется по мере ужесточения параметров взаимодействия (например, с увеличением скорости взаимодействия) (см. рис. 4б). При этом возникают температурные поля, которые изменяются в зависимости от параметров взаимодействия. Так, максимальная температура тела может достигать 700 °С и подниматься выше. Анализ результатов показал, что температурный фактор оказывает существенное влияние на деформирование и разрушение тела [4].

Полученные результаты, в которых учтены особенности сложных физических процессов, протекающих при соударении АЧ с КА, позволяющие прогнозировать повреждения КА в зависимости от изменения материала, размеров и скорости АЧ, обеспечивают возможность накопления достоверных данных о последствиях ударов АЧ по КА (эта информация может уточняться и дополняться новой).

Компьютерное моделирование дает возможность формировать расширенный набор данных для прецедентов, результаты которых могут быть проверены в ходе расчетно-экспериментального моделирования и специальных натурных экспериментов. В совокупности это позволяет перейти к созданию рабочей выборки, необходимой для построения интеллектуальной системы управления защитой перспективных КА.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен метод оценки различий между результатами натурного 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 оценкой результатов моделирования, перейти от структур данных к структурам знаний, то есть к интеллектуальным технологиям изучения результатов экспериментов и построения рабочей выборки.

Эти результаты могут быть использованы для составления теоретических и прикладных основ построения интеллектуальной системы управления защитой перспективных КА от ударов АЧ.

В программной среде ANSYS была разработана верифицированная компьютерная модель для оценки параметров зоны динамического взаимодействия твердых тел. Эта 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.

Разработанная технология значительно расширяет объем результатов расчетно-экспериментального моделирования и натурных экспериментов по структуре и результатам взаимодействия твердых тел, протекающих при различных условиях, необходимых для построения рабочей выборки данных, используемых для построения интеллектуальных систем управления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Paliukh 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 // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2017. V. 658. P. 248–257.

2. Paliukh 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 // *Proceedings of the Third International Scientific Conference «Intelligent Information Technologies for Industry» (IITI'18)*. 2019. P. 293–302.

3. Теоретические и экспериментальные исследования высокоскоростного взаимодействия тел / под ред. А.В. Герасимова. Томск: Издательство Томского университета. 2007. 572 с.

4. 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.

5. Schonberg W.P. Studies of Hypervelocity Impact Phenomena as Applied to the Protection of Spacecraft Operating in the MMOD Environment // *Procedia Engineering*. 2017. V. 204. P. 4–42.

6. Smirnov N.N., Kiselev A.B., Kondratyev K.A., Zolkin S.N. Impact of Debris Particles on Space Structures Modeling // *Acta Astronautica*. 2010. V. 67. № 3. P. 333–343.

7. Meshkov V.V., Fedosov Yu.A., Filatova N.N. An Integrated System for Modeling Hypervelocity Interaction of Solids // *Acta Astronautica*. 2021. V. 178. P. 606–615.

8. ANSYS LS-DYNA User's Guide. 2009. 200 p. URL: https://bajatutor.net/wp-content/uploads/2017/04/ans_lsd.pdf (дата обращения: 07.08.2022).

9. LS-DYNA. Theory Manual / compiled by J.O. Hallquist. California. 2006. 680 p. URL: https://www.oasys-software.com/dyna/wp-content/uploads/2018/02/ls-dyna_theory_manual_2006.pdf (дата обращения: 07.08.2022).

10. Zimmermann H.-J. Fuzzy Set Theory and Its Applications. Kluwer: Dordrecht. 1991. 315 p.

11. Amza C.G., Cicic D.T. Industrial Image Processing Using Fuzzy-Logic // *Procedia Engineering*. 2015. V. 100. P. 492–498.

12. Миловидов А.А., Филатова Н.Н. Программный комплекс для лингвистической интерпретации графических зависимостей с нечеткими координатами // *Программные продукты и системы*. 2011. № 3 (95). С. 110–114.

13. Kaufman L., Rousseeuw P.J. Finding Groupsin Data: An Introduction to Cluster Analysis. NewYork: Wiley. 1990. 355 p.

14. Everitt B.S., Landau S., Leese M. Cluster Analysis. London: Arnold Oxford University Press. 2001. 357 p.

15. Пен Р. Планирование эксперимента. Реализация в среде Statgraphics. Лондон: LAP Lambert Academic Publishing. 2011. 268 с.

Для цитирования: Мешков В.В., Филатова Н.Н., Кемайкин В.К. Формирование рабочей выборки для интеллектуальной системы управления с использованием результатов экспериментальных исследований и компьютерного моделирования // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2023. № 1 (17). С. 103–111.

FORMATION OF A TRAINING SAMPLE FOR AN INTELLIGENT CONTROL SYSTEM USING THE RESULTS OF EXPERIMENTAL RESEARCH AND COMPUTER MODELING

V.V. MESHKOV, Dr. Sc., N.N. FILATOVA, Dr. Sc.,
V.K. KEMAYKIN, Cand. Sc.

Tver State Technical University,
22, Af. Nikitin emb., Tver, 170026, Russian Federation, e-mail: msf-tgtu@yandex.ru

A concept is proposed and an algorithm is developed 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 verified computer model for estimating the zone of dynamic interaction of solids is proposed. The results of modeling the hypersonic impact of anthropogenic particles on model samples and full-scale elements of the hybrid shell of the spacecraft are discussed.

Keywords: intelligent system, precendant, cluster analysis, verification, computer modeling, working sample.

Поступила в редакцию/recived: 13.09.2022; после рецензирования/revised: 03.10.2022; принята/accepted: 25.10.2022