

УДК 629.78.04  
DOI: 10.15827/0236-235X.125.124-129

Дата подачи статьи: 10.12.18  
2019. Т. 32. № 1. С. 124–129

## Формирование барьера безопасности на космическом аппарате при угрозе воздействия космического мусора методами нечеткой логики

В.К. Кемайкин<sup>1</sup>, к.т.н., доцент, vk-ket@mail.ru  
И.В. Кожухин<sup>1</sup>, аспирант, kozhukhin@mail.ru

<sup>1</sup> Тверской государственный технический университет, кафедра «Информационные системы», г. Тверь, 170026, Россия

В статье предложен алгоритм формирования барьера безопасности от воздействия космического мусора для автономного функционирования космического аппарата. Эффективность барьера безопасности зависит от показателей оперативности, экономичности и действенности (надежности) мер по защите, составляющих содержание барьера безопасности. В настоящее время барьер безопасности формируется из реализованных на борту космического аппарата мер с участием оператора в автоматизированном режиме. Для этого космический мусор должен быть своевременно обнаружен и время до прогнозируемого столкновения должно быть достаточным для выработки решения (порядка 28 часов). Тогда оператор может оценить и учесть важность параметров и сформировать адекватный барьер с учетом складывающейся обстановки. В иных случаях опасности столкновения с космическим мусором выполняется автоматический маневр уклонения, связанный с изменением параметров орбиты космического аппарата.

В условиях автономного орбитального функционирования космического аппарата возникает задача оценки эффективности барьера безопасности, при которой учитывались бы условия обстановки, но его формирование проводилось на борту космического аппарата в автоматическом режиме реального времени.

Разработанная база знаний важности параметров позволяет проводить оценку эффективности барьера безопасности с учетом складывающейся обстановки по каждому потенциально опасному (по критерию опасного сближения) объекту в цикле автоматического функционирования бортовой вычислительной машины управления. Требование автономности функционирования космического аппарата и парирования возможной угрозы от столкновения с космическим мусором основано на использовании теории нечетких множеств, в том числе принципа нечеткого слияния целей и ограничений. Исходные оценки эффективности барьера безопасности реализуют принцип гарантированного результата при равновесности критериев, по которым проводится оценка. В реальном времени уточняются оценки эффективности с учетом важности параметров барьера безопасности, которые представляются наборами правил из базы знаний по требуемым и существующим ограничениям по действенности (надежности), времени и расходу топлива на реализацию потенциальных барьеров безопасности. Полученные результаты показывают, что в реальных условиях обстановки эффективность потенциальных барьеров безопасности может изменяться с учетом важности параметров.

**Ключевые слова:** космический мусор, барьер безопасности космического аппарата, база знаний, нечеткий логический вывод, нечеткий анализ иерархий, матрица парных сравнений.

Функционирование космических аппаратов (КА) на орбите осуществляется в условиях воздействия большого количества факторов, имеющих внешнюю и внутреннюю природу, среди которых выделяются механические опасности (в том числе метеоритные), основной из которых является космический мусор (КМ). Обеспечение безопасности КА от воздействия КМ осуществляется защитными мерами различного характера, имеющими свою специфику и составляющими понятие барьера безопасности.

Под барьером безопасности понимаются функция, изделие, материал, ПО, действия оператора и т.д., целью которых являются предотвращение, остановка или замедление развития опасной ситуации.

Барьером безопасности могут быть физическое свойство, конструктивная характеристика, технологическое устройство.

Эффективность барьера безопасности оценивается в пространстве – оперативность, экономичность и действенность (надежность) барьера.

Барьеры, противостоящие одному и тому же событию, должны быть не зависимыми друг от друга и по возможности отличаться по природе, то есть это мо-

жет быть механический, электрический, электронный, программный и другие барьеры.

Задача обеспечения безопасности КА решается в два этапа.

1. Разработка защитных мер КА различного характера, которые имеют свою специфику (ОСТ 134-1031-2003), и их реализация на этапе производства КА [1, 2].

2. Формирование барьеров безопасности на основе оценки эффективности защитных мер и условий, складывающихся при угрозе воздействия КМ на КА.

Для реализации указанного функционала предложено использовать комплексную интеллектуальную систему (КИС) КА, предназначенную для решения задач обнаружения и сопровождения объектов КМ с помощью оптико-электронных датчиков КА, выделения опасных для КА объектов КМ и ведения их оперативного каталога, прогнозирования результатов воздействия КМ на КА, выбора и применения из множества реализованных на борту мер по безопасности действенного барьера на основе всесторонней оценки обстановки. Актуальным является обеспечение указанного функционала в реальном масштабе вре-

мени в автоматическом режиме функционирования КИС.

Выделяют три вида защиты КА от возможного воздействия КМ: пассивная, активная и операционная (стандарт IADC) [3].

Пассивная защита включает усиление приборного контейнера и элементов КА путем нанесения специальных защитных покрытий (например, экранно-вакуумная теплоизоляция) или установки защитных экранов (бамперов) для бронирования корпуса КА и его конструкций. Известен способ защиты, включающий формирование защитного экрана, его отделение от защищаемого аппарата и направление в сторону потенциально опасных объектов [4].

Для выбора мер пассивной защиты необходимо учитывать размеры, материал и скорость объектов КМ, которые могут поразить КА, а также время для развертывания выносных экранов. В настоящее время проблема защиты КА от воздействия частиц мелкого КМ быть решена только за счет применения защитных экранов.

Активная защита основана на совместном использовании средств обнаружения и предупреждения о возможном столкновении с КМ и аварийных программ: маневра выведения КА из опасной зоны на другую орбиту, маневра уклонения КА от столкновения с опасным фрагментом КМ с последующим возвращением на исходную орбиту; возможны изменения орбиты других тел для исключения столкновения. Требованиями для реализации мер активной защиты являются имеющиеся запасы топлива (энергетики), необходимые для выполнения программы и дальнейшего функционирования КА; располагаемое время до возможного столкновения с КМ и время, необходимое для расчета и выполнения программы.

Операционная защита предусматривает выполнение набора команд (программ) управления, связанных с изменением режимов работы бортовых систем, компоновочной схемы конструкций и с ориентацией КА относительно центра масс для снижения ущерба поражения КА от налетающих частиц КМ.

Требованиями по операционной защите являются время до возможного столкновения, ограничивающее выполнение команд (программ) управления, запасы топлива на борту, а также размеры, материал и скорость объекта КМ, которые могут воздействовать на КА.

Формирование комплекса мер на этапе разработки и производства позволяет заблаговременно предусмотреть и внедрить меры, достаточные для защиты КА различного целевого назначения [5–7]. Это предполагает выбор материалов и компоновочной схемы построения КА, определение характеристик основных бортовых систем и их размещение в приборном контейнере, разработку аварийных программ по переводу КА в дежурный режим и т.д. Решения на этом этапе связаны с поиском компромисса между допустимым

уровнем ущерба КА при столкновении с КМ, добавленной массой средств защиты и допустимым снижением массы полезной нагрузки. Методической основой указанной операции может быть построение группового упорядочивания не сравнимых между собой по Парето мер обеспечения безопасности КА от возможного воздействия КМ.

Все рассматриваемые барьеры (комплексы мер)  $x \in X$  упорядочиваются по отдельным показателям и группируются по признаку их несравнимости в отдельные подмножества. Для реализации на этапе разработки и производства КА выбираются барьеры, включающие меры первого подмножества – наилучшие по отдельным критериям.

В условиях орбитального функционирования КА должна решаться задача выбора и применения барьера (набор предусмотренных мер), достаточного по уровню надежности и адекватного складывающейся ситуации. На этом этапе уточняется оценка эффективности способов с учетом важности критериев: по располагаемому до столкновения времени, имеющемуся на борту запасу топлива и требованиям к дальнейшему использованию и существованию КА.

Оценка эффективности барьеров является многокритериальной задачей анализа, которая возникает при разработке и изготовлении КА и требует своего уточнения в процессе его функционирования при реальной угрозе столкновения с КМ.

Известные методики многопараметрического анализа [8] предусматривают преобразование вектора параметров оценки к скалярному обобщенному показателю с учетом весовых коэффициентов. Весовые коэффициенты определяются заблаговременно и призваны отражать важность каждого параметра и его вклад в интегральный показатель.

Существенное ограничение такого подхода состоит в том, что он плохо приспособлен к оценкам экспертов и учету реальных условий, складывающихся в космосе при угрозе КМ.

Предложенный алгоритм включает два этапа.

Первый этап выполняется заблаговременно (на Земле), при этом не требуются ни количественные оценки параметров барьеров, ни процедуры их скаляризации. Для его проведения используется экспертная информация в виде парных сравнений:

- по оперативности (барьер безопасности 1 приблизительно такой же, как и барьер 3);
- по результативности (барьер безопасности 2 лучше, чем барьер 3);
- по экономичности (барьер безопасности 3 намного лучше, чем барьер 2) и т.д.

Второй этап осуществляется в реальном масштабе времени на борту КА. Для его выполнения используется включенная в состав КИС КА БЗ, отражающая представления экспертов о величине параметров барьера в различных условиях обстановки.

Исходные данные:

$S = \{s_1, s_2, \dots, s_v\}$  – множество альтернативных мер (барьеров) обеспечения безопасности, которые могут рассматриваться для защиты КА от КМ;

$C = \{c_1, c_2, c_3\}$  – множество параметров оценки барьера безопасности;

$F = (f_1, f_2, f_3)$  – показатели важности параметров оценки барьера, определяемые из условий обстановки.

Задача состоит в том, чтобы упорядочить барьеры из множества  $S$  по параметрам из множества  $C$  с учетом их важности  $F$  в реальном времени, то есть в цикле работы бортового комплекса управления при обнаружении КМ.

Пусть  $\mu^l(s_v)$  – число в диапазоне  $[0, 1]$ , которое характеризует барьер  $s_v$  по параметру  $c^l$ : чем больше число  $\mu^l(s_v)$ , тем выше оценка барьера безопасности по параметру  $c^l$ ,  $l = 1, \dots, m$ .

Тогда параметр  $c^l$  можно представить в виде нечеткого множества, которое задано на универсальном множестве  $S$ :

$$c^l = \left\{ \frac{\mu^l(s_1)}{s_1}, \frac{\mu^l(s_2)}{s_2}, \frac{\mu^l(s_3)}{s_3} \right\}, \quad (1)$$

где  $\mu^l(s_v)$  – степень принадлежности  $s_v$  к нечеткому множеству  $c^l$ .

**Первый этап.** Для определения степени принадлежности из (1) заблаговременно по каждому барьеру из множества  $S$  сформируем матрицы парных сравнений по каждому параметру [9]. Общее количество матриц определяется количеством параметров и равно  $l$ .

Для параметра  $c^l$  матрица парных сравнений имеет вид:

$$A^l = \begin{matrix} & s_1 & s_2 & s_n \\ s_1 & a_{11}^l & a_{12}^l & a_{1n}^l \\ s_2 & a_{21}^l & a_{22}^l & a_{2n}^l \\ s_n & a_{n1}^l & a_{n2}^l & a_{nn}^l \end{matrix}, \quad (2)$$

где элемент  $a_{ij}$  оценивается экспертом по 9-балльной шкале Саати.

Знание матрицы (2) позволяет с использованием метода Саати проранжировать и упорядочить множество  $S$  по каждому параметру оценки  $c^l$ . Для получения первых приближений искомых характеристик рангов использована процедура, предложенная в [9], которая предполагает, что матрица (2) имеет следующие свойства:

- она диагональная, то есть  $a_{ii} = 1, i = 1, \dots, v$ ; элементы, симметричные относительно главной диагонали, связаны зависимостью  $a_{ij} = 1/a_{ji}$ ;
- она транзитивная, то есть  $a_{ik}a_{kj} = a_{ij}$ .

Наличие этих свойств позволяет определить все элементы матрицы по элементам одной строки. Если известна  $k$ -я строка, то есть элементы  $a_{kj}$ , то произвольный элемент  $a_{ij}$  определяется следующим образом:

$$a_{ij}^l = \frac{a_{kj}^l}{a_{ki}^l}, \quad i, j, k = \overline{1, v}. \quad (3)$$

После определения всех элементов матрицы степени принадлежности, необходимые для формирования нечеткого множества (1), вычисляются по формуле

$$\mu^l(s_v) = \frac{1}{a_{v1}^l + a_{v2}^l + \dots + a_{vk}^l}. \quad (4)$$

Исходя из принципа Беллмана–Заде [10], наилучшим барьером безопасности является тот, который имеет гарантированную оценку по параметрам  $c_1, c_2, c_3$ . Поэтому нечеткое множество, необходимое для получения оценки, определяется в виде пересечения (показатель эффективности барьера):

$$K_{sv} = c_1 \cap c_2 \cap c_3. \quad (5)$$

Учитывая то, что в теории нечетких множеств операции пересечения соответствует  $\min$ , получаем:

$$K_s = \left\{ \frac{\min_{l=1..3} \mu^l(s_1)}{s_1}, \frac{\min_{l=1..3} \mu^l(s_2)}{s_2}, \frac{\min_{l=1..3} \mu^l(s_v)}{s_v} \right\}. \quad (6)$$

Наилучшим способом следует считать тот, для которого степень принадлежности (числитель) является наибольшей.

**Второй этап.** В условиях автономного орбитального функционирования КА особое значение приобретает оценка параметров по важности, которая должна проводиться в реальном времени при анализе обстановки. Пусть  $f_1, f_2, f_3$  – коэффициенты важности (или ранги) параметров барьера безопасности. Ранжирование методом парных сравнений становится неприемлемым, так как эксперты напрямую не включены в цикл функционирования КИС КА.

В реальном времени коэффициенты  $f_i$  могут быть получены как решения системы нечетких логических уравнений [11]. Эти уравнения строятся на базе матрицы знаний или изоморфной ей системы логических высказываний о важности параметров способа и позволяют вычислять значения функций принадлежности при фиксированных входных переменных.

Как входные рассматриваются следующие лингвистические переменные: располагаемое до столкновения с КМ и требуемое на формирование барьера время; имеющийся на борту КА запас топлива и его требуемый расход на реализацию барьера, прогнозируемая вероятность повреждения КА и действенность (надежность) барьера, представленные в виде функций принадлежности.

Выходными являются коэффициенты важности параметров барьера безопасности.

Матрица знаний формируется по следующим правилам [12].

1. Ее размерность равна  $(n + 1)N$ , где  $(n + 1)$  – число столбцов, а  $N = k_1 + k_2 + \dots + k_m$ ,  $m$  – число строк.

2. Первые  $n$  столбцов матрицы соответствуют входным переменным  $x_i, i = 1, \dots, n$ , а  $(n + 1)$ -й столбец соответствует значениям  $f_j (j = 1, \dots, m)$ .

3. Каждая строка матрицы представляет некоторую комбинацию значений входных переменных, отнесенную экспертом к одному из возможных значений

выходной переменной. При этом первые  $k_1$  строк соответствуют значению выходной переменной  $f_1$ , вторые  $k_2$  строк – значению  $f_2$ , ..., последние  $k_m$  строк – значению  $f_m$ .

4. Элемент  $a_i^{jp}$ , стоящий на пересечении  $i$ -го столбца и  $jp$ -й строки, соответствует лингвистической оценке параметра  $x_i$  в строке матрицы знаний с номером  $jp$ . При этом лингвистическая оценка  $a_i^{jp}$  выбирается из терм-множества переменной  $x_i$ , то есть  $a_i^{jp} \in A_i, i = 1, \dots, n, j = 1, \dots, m, p = 1, \dots, k_j$ .

Нечеткие логические уравнения составлены путем замены лингвистических термов  $a_i^{jp}$  и  $f^l$  лингвистической оценки соответствующими значениями функций принадлежности в строке матрицы знаний с номером  $jp$  для каждого параметра  $c_i$ .

Кратко систему логических уравнений можно записать следующим образом:

$$\mu^{f_l}(x_1, x_2, \dots, x_n) = \bigvee_{p=1}^{k_j} \left[ \bigwedge_{i=1}^n \mu^{a_i^{jp}}(x_i) \right], l = \overline{1, m}. \quad (7)$$

При вычислениях логические операции И ( $\wedge$ ) и ИЛИ ( $\vee$ ) над функциями принадлежности заменяются на операции  $\min$  и  $\max$ :

$$\mu^{f_l}(x_1, x_2, \dots, x_n) = \max_{p=1, k_j} \left\{ \min_{i=1, n} \left( \mu^{a_i^{jp}}(x_i) \right) \right\}, j = \overline{1, m}. \quad (8)$$

При наличии коэффициентов важности  $f_l, l = 1, \dots, 3$ , формула (6) имеет вид

$$K_s = \left\{ \frac{\min_{l=1,3} \mu^l(s_1)^{f_l}}{s_1}, \frac{\min_{l=1,3} \mu^l(s_2)^{f_l}}{s_2}, \frac{\min_{l=1,3} \mu^l(s_v)^{f_l}}{s_v} \right\}, \quad (9)$$

где степень  $f_l$  свидетельствует о концентрации нечеткого множества в соответствии с мерой важности параметра  $c_i$ .

Алгоритм решения задачи:

- рассмотрение параметров оценки альтернативных способов как нечетких множеств, которые заданы на универсальном множестве способов устранения неисправностей с помощью функций принадлежности;
- определение функций принадлежности нечетких множеств на основе экспертной информации о парных сравнениях способов устранения неисправностей с помощью 9-балльной шкалы Саати;
- оценка эффективности барьеров безопасности на основе пересечения нечетких множеств (принцип Беллмана–Заде);
- оценка важности параметров способа с использованием нечеткого логического вывода и учет полученных весов как степеней концентрации соответствующих функций принадлежности;
- оценка эффективности для выбора способа с учетом складывающейся обстановки.

### Обсуждение результатов

Для проверки методики рассмотрено ограниченное множество альтернативных барьеров:

$s_1$  – выполнение маневра по уклонению (аварийной программы по подъему перигея на 20 км);

$s_2$  – развертывание в направлении налетающего КМ защитного экрана;

$s_3$  – переход КА в дежурный режим (постоянной солнечной ориентации).

Для способов определим следующие параметры оценки:  $c_1$  – оперативность способа,  $c_2$  – экономичность способа,  $c_3$  – результативность способа.

Избранное множество параметров не является замкнутым и может дополняться в зависимости от требований по защите КА.

1. По результатам проведения заблаговременной экспертизы получены высказывания по параметрам оценки способа.

Оперативность барьера: явное преимущество  $s_3$  и  $s_2$  над  $s_1$ , слабое преимущество  $s_3$  над  $s_2$ , существенное преимущество  $s_1$  над  $s_2$ .

Экономичность барьера: явное преимущество  $s_1$  над  $s_3$ , существенное преимущество  $s_2$  над  $s_3$ .

Результативность способа: существенное преимущество  $s_2$  над  $s_1$ , почти явное преимущество  $s_1$  над  $s_3$ , почти слабое преимущество  $s_2$  над  $s_3$ .

Приведенным экспертным высказываниям соответствуют матрицы парных сравнений, полученные с использованием шкалы Саати:

$$A(c_1) = \begin{matrix} & s_1 & s_2 & s_3 \\ s_1 & 1 & 7 & 7 \\ s_2 & 1/7 & 1 & 3 \\ s_3 & 1/7 & 1/3 & 1 \end{matrix},$$

$$A(c_2) = \begin{matrix} & s_1 & s_2 & s_3 \\ s_1 & 1 & 1/5 & 1/7 \\ s_2 & 5 & 1 & 1/5 \\ s_3 & 7 & 5 & 1 \end{matrix},$$

$$A(c_3) = \begin{matrix} & s_1 & s_2 & s_3 \\ s_1 & 1 & 5 & 1/6 \\ s_2 & 1/5 & 1 & 1/2 \\ s_3 & 6 & 2 & 1 \end{matrix}.$$

Пользуясь матрицами парных сравнений и формулой (4), получим

$$c_1 = \left\{ \frac{0,125}{s_1}, \frac{0,24}{s_2}, \frac{0,68}{s_3} \right\},$$

$$c_2 = \left\{ \frac{0,75}{s_1}, \frac{0,16}{s_2}, \frac{0,08}{s_3} \right\},$$

$$c_3 = \left\{ \frac{0,16}{s_1}, \frac{0,59}{s_2}, \frac{0,11}{s_3} \right\}.$$

Пользуясь нечеткими множествами для  $c_1$ – $c_3$  и моделью (6), получим  $K_s = \left\{ \frac{0,125}{s_1}, \frac{0,16}{s_2}, \frac{0,08}{s_3} \right\}$ , что свидетельствует о предпочтении  $s_2$  перед  $s_1$  и  $s_3$ .

2. При обнаружении объекта КМ, который является потенциально опасным (в контексте сближения с КА) и по которому следует принять меры, реализовать барьер безопасности, необходимо уточнить оценки эффективности возможных барьеров.

На момент обнаружения КМ КИС КА в реальном времени рассчитывает требуемые исходные данные.

Временные характеристики возможного столкновения: время до возможного столкновения и время на выполнение каждой из реализованных на борту КА мер (барьера).

Вещественные характеристики возможного столкновения: запас топлива на борту КА, требуемый расход топлива для выполнения каждого из реализованных на борту КА мер (барьера).

Вероятностные характеристики возможного столкновения:

- вероятность столкновения КА и КМ;
- вероятность (риск) повреждения КМ элементов или КА в целом;
- вероятность сохранения функционала КА, которая определяет требования по действенности (надежности) и дальнейшему функционированию КА.

Указанные параметры представляются лингвистическими переменными, и для них составляются нечеткие матрицы знаний, объединенные в нечеткую БЗ КИС КА.

В процессе функционирования КА задача решается в цикле функционирования бортового комплекса управления с участием КИС КА на основе нечеткого логического вывода с использованием БЗ о важности параметров барьера.

Для проведения расчета по каждому параметру используются правила вида:

Если Время до возможного столкновения = малое И Время на выполнение барьера (комплекса мер) = среднее, ТО Оперативность = Очевидное превосходство;

Если Запас топлива на борту = большой И Требуемый расход топлива для барьера (комплекса мер) = малый, ТО экономичность = Умеренное (слабое) превосходство;

Если Вероятность столкновения = большая И Вероятность (риск) повреждения = большая И Вероятность сохранения функционала КА = большая, ТО Действенность (надежность) = Сильное (существенное) превосходство.

Всего в БЗ включено 28 продукционных правил.

Составленные на основе указанных правил с использованием шкалы Саати матрицы парных сравнений позволяют получить следующие расчетные значения:  $f_1 = 0,68$ ,  $f_2 = 0,2$ ,  $f_3 = 0,12$ , а оценки параметров с учетом рангов:

$$c_1 = \left\{ \frac{0,125^{0,68}}{s_1}, \frac{0,24^{0,68}}{s_2}, \frac{0,68^{0,68}}{s_3} \right\} = \left\{ \frac{0,24}{s_1}, \frac{0,37}{s_2}, \frac{0,77}{s_3} \right\},$$

$$c_2 = \left\{ \frac{0,75^{0,2}}{s_1}, \frac{0,16^{0,2}}{s_2}, \frac{0,08^{0,2}}{s_3} \right\} = \left\{ \frac{0,94}{s_1}, \frac{0,69}{s_2}, \frac{0,6}{s_3} \right\},$$

$$c_3 = \left\{ \frac{0,16^{0,12}}{s_1}, \frac{0,59^{0,12}}{s_2}, \frac{0,11^{0,12}}{s_3} \right\} = \left\{ \frac{0,08}{s_1}, \frac{0,94}{s_2}, \frac{0,77}{s_3} \right\}.$$

Эффективность барьера безопасности определяется следующим образом:  $K_s = \left\{ \frac{0,24}{s_1}, \frac{0,37}{s_2}, \frac{0,6}{s_3} \right\}$ ,

что характеризует эффективность барьера с учетом условий обстановки, определяемых располагаемым и требуемым запасом топлива, временем и требованиями к дальнейшему функционированию КА.

Существует предпочтение в реализации барьера  $s_3$  в условиях доминирования требования по оперативности защиты КА от указанного объекта КМ.

## Выводы

Разработка и проектирование КА предусматривают выполнение требований по защите от возможного воздействия объектов КМ. Перечень мер по выполнению требований включается в состав технических решений, реализованных на КА. Это комплекс мер, составляющих понятие барьера безопасности, применение которых должно быть обоснованным и соответствовать уровню возможной угрозы столкновения и, что важнее, уровню ущерба от его последствий.

В работе предложен метод формирования барьера безопасности на основе оперативного учета условий обстановки функционирования КА.

Требование автономности функционирования КА и парирования возможной угрозы от столкновения с КМ основано на использовании теории нечетких множеств, в том числе на принципе нечеткого слияния целей и ограничений. Полученные оценки эффективности способа реализуют принцип гарантированного результата при равновесности критериев, по которым проводится оценка. По каждому обнаруженному объекту КМ в реальном времени проводится уточнение оценки эффективности с учетом набора правил о требуемых и существующих ресурсных ограничениях по надежности, времени и расходу топлива на реализацию потенциальных барьеров безопасности. Представлен пример расчета оценки эффективности барьера безопасности, который указывает, как установленное требование по оперативности проводимой защиты приводит к изменению выбора реализуемого барьера безопасности.

## Литература

1. Destefanis R., Amerio E., Briccarello M., Belluco M., Farud M., Tracino E., Lobascio C. Space environment characterisation of Kevlar®: good for bullets, debris and radiation too. *Universal J. of Aeronautical & Aerospace Sc.*, 2014, vol. 2, pp. 80–113.
2. Destefank D., Lambert M., Schfer F., Drolshagen G., Francesconi D. Debris shielding development for the ATV integrated cargo carrier. *Proc. 4th Europ. Conf. Space Debris*, 2005, pp. 453–458. URL: <http://adsabs.harvard.edu/full/2005ESASP.587..453D> (дата обращения: 02.12.18).
3. Зеленцов В.В. Защита космического аппарата от воздействия фрагментов мелкого космического мусора // *Наука и образование*. 2015. № 6. С. 123–142. DOI: 10.7463/0615.0778339.

4. Анисимов В.Ю., Борисов Э.В., Ролдугин В.А., Пономарев С.А. Способ защиты космических объектов. Патент РФ на изобретение № 2294866: заявл. 06.02.2005; опублик. 10.03.2007, бюл. № 7. URL: <http://www.findpatent.ru/patent/253/2532003.html> (дата обращения: 02.12.18).

5. Кобылкин И.Ф., Селиванов В.В. Материалы и структуры легкой бронезащиты. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. 191 с.

6. Герасимов А.В., Пашков С.В., Христенко Ю.Ф. Защита космических аппаратов от техногенных и естественных осколков, эксперимент и численное моделирование // Вестн. Томского гос. ун-та: Математика и механика. 2011. № 4. С. 70–78.

7. Ryan S., Christiansen E.L. Honeycomb vs. foam: evaluating a potential upgrade to ISS module shielding for micrometeoroids and orbital debris. Technical Report NASA/TM-2009-214793, 2009.

8. Лотов А.В., Поспелова И.И. Многокритериальные задачи принятия решений. М.: МАКС Пресс, 2008. 197 с.

9. Ротштейн А.П. Интеллектуальные технологии идентификации. Винница: Универсум-Винница, 1999. 320 с.

10. Беллман Р., Заде Л. Принятие решений в расплывчатых условиях // Вопросы анализа и процедуры принятия решений. М.: Мир, 1976. С. 172–215.

11. Мухаметзянов И.З. Нечеткий логический вывод и нечеткий метод анализа иерархий в системах поддержки принятия решений: приложение к оценке надежности технических систем // Кибернетика и программирование. 2017. № 2. С. 59–77. DOI: 10.7256/2306-4196.2017.2.21794.

12. Борисов А.Н., Крумберг О.А., Федоров И.П. Принятие решения на основе нечетких моделей: примеры использования. Рига: Знание, 1990. 184 с.

Software & Systems

DOI: 10.15827/0236-235X.125.124-129

Received 10.12.18

2019, vol. 32, no. 1, pp. 124–129

### Formation of a safety barrier for a spacecraft under space debris impact using fuzzy logic methods

V.K. Kemaykin<sup>1</sup>, Ph.D. (Engineering), Associate Professor, vk-kem@mail.ru

I.V. Kozhukhin<sup>1</sup>, Postgraduate Student, kozhukhin@mail.ru

<sup>1</sup>Tver State Technical University, Information Systems Department, Tver, 170026, Russian Federation

**Abstract.** The paper proposes the algorithm to form a safety barrier from space debris impact for a spacecraft independent operation. The efficiency of the safety barrier depends on responsiveness, economy and efficiency (reliability) of protective measures that form the safety barrier. Nowadays, the safety barrier includes measures implemented in a spacecraft with the human operator in an automatic mode. For this purpose, space debris must be detected in time and the time to a predicted collision must be sufficient to make a decision (about 28 hours). Then an operator can evaluate and consider the importance of parameters and form a proper barrier. An automatic avoidance maneuver is performed for other cases when there might be a collision with space debris. This maneuver associates with changes in the orbital parameters of a spacecraft.

The task of safety barrier efficiency estimation appears under the conditions of autonomous orbital functioning of a spacecraft. This task should take into account environmental conditions, when safety barrier is formed automatically in real time mode on board.

The developed knowledge base of parameter importance allows estimating the safety barrier effectiveness taking into account the situation for each potentially dangerous (by the collision criterion) object in the automatic operation cycle of an on board spacecraft computer. The requirement for spacecraft functioning autonomy and the countering of a possible danger from a space debris impact is based on the use of the fuzzy set theory including the principle of fuzzy merging of objectives and restrictions. Initial estimates of a safety barrier effectiveness implement the principle of a guaranteed result with estimable criteria balance. Real-time estimation of the effectiveness takes into account the importance of safety barrier parameters, which are sets of rules from the knowledge base about the required and existing effectiveness (reliability) restrictions, time and fuel consumption for implementing potential safety barriers.

The obtained results show that the effectiveness of potential safety barriers may vary in real conditions depending on the importance of the parameters.

**Keywords:** space debris, the manner of spacecraft protection, fuzzy logical conclusion, knowledge base, fuzzy analytic hierarchy process, paired comparison matrix.

### References

1. Destefanis R., Amerio E., Briccarello M., Belluco M., Faraut M., Tracino E., Lobascio C. Space environment characterisation of Kevlar: good for bullets, debris and radiation too. *Universal J. of Aeronautical & Aerospace Sciences*. 2014, vol. 2, pp. 80–113.

2. Destefank D., Lambert M., Schäfer F., Drolshagen G., Francesconi D. Debris shielding development for the ATV integrated cargo carrier. *Proc. 4th European Conf. on Space Debris. ESA/ESOC*. Darmstadt, Germany, 2005, pp. 453–458. Available at: <http://adsabs.harvard.edu/full/2005ESASP.587..453D.html> (accessed December 2, 2018).

3. Zelentsov V.V. A spacecraft protection from impact of small space debris fragments. *Science and Education*. Moscow, 2015, no. 6, pp. 123–142 (in Russ.). DOI: 10.7463/0615.0778339.

4. Anisimov V.Yu., Borisov E.V., Roldugin V.A., Ponomarev S.A. *The Method to Protect Space Objects*. RF Patent no. 2294866. 2007. Available at: <http://www.findpatent.ru/patent/229/2294866.html> (accessed December 2, 2018).

5. Kobylkin I.F., Selivanov V.V. *Materials and Structures of Light Armor Protection*. BMSTU Publ., Moscow, 2014, 191 p.

6. Gerasimov A.V., Pashkov S.V., Khristenko Yu.F. Protection of spacecrafts from anthropogenic and natural fragments. Experiment and numerical simulation. *Bulletin of Tomsk State Univ. Mathematics and Mechanics*. 2011, no. 4, pp. 70–78 (in Russ.).

7. Ryan S., Christiansen E.L. *Honeycomb vs. Foam: Evaluating a Potential Upgrade to ISS Module Shielding for Micrometeoroids and Orbital Debris*. NASA/TM-2009-000000, 2009.

8. Lotov A.V., Pospelova I.I. *Multi-Criteria Decision-Making Problems*. Moscow, MAKS Press., 2008, 197 p.

9. Rotshteyn A.P. *Intellectual Technologies of Identification*. Universum, Vinnitsa, Ukraine, 1999.

10. Bellman R., Zadeh L. Decision-making in a fuzzy environment. *Management Science*. 1970, vol. 17, no. 4, pp. 141–160. (Russ. ed.: Moscow, Mir Publ., 1976).

11. Muhametzyanov I.Z. Fuzzy logic inference and a fuzzy method of hierarchy analysis in decision support systems: an application to the evaluation of the reliability of technical systems. *Cybernetics and Programming*. 2017, no. 2, pp. 59–77 (in Russ.). DOI: 10.7256/2306-4196.2017.2.21794.

12. Borisov A.N., Krumberg O.A., Fedorov I.P. *Decision-Making Based on Fuzzy Models: Examples of Use*. Riga, Znanie, 1990, 184 p.