

4. **Неменюк Б. М.** Теория и практика комплексного модифицирования силовых / Б. М. Неменюк. – Л. : Технопринт, 1999. – 272 с.
5. **Петров Л. Н.** Коррозионно-механическое разрушение металлов и сплавов / Л. Н. Петров, Н. Г. Сопроноук. – К. : Наук. думка, 1991. – 216 с.
6. **Синявский В. С.** Коррозия и защита алюминиевых сплавов / В. С. Синявский, В. Д. Вальков, В. Д. Калинин. – М. : Металлургия, 1986. – 368 с.

Надійшла до редколегії 03.11.2014.

УДК 629.764

А. В. Голубек

Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМНЫХ СБЛИЖЕНИЙ РАКЕТЫ-НОСИТЕЛЯ НА АКТИВНОМ УЧАСТКЕ ТРАЕКТОРИИ С КОСМИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ

Проведено математичне моделювання сумісного руху ракети-носія та угруповання каталогізованих космічних об'єктів. Отримано розподіл кількості зближень на відстань менше 5 км по відносній відстані, відносній швидкості та куту зустрічі. Оцінено ймовірність зіткнення.

Ключові слова: ракета-носіє, угруповання каталогізованих космічних об'єктів, сумісний рух, ймовірність зіткнення, відносна швидкість зближення, відносна відстань зближення, кут зустрічі.

Проведено математическое моделирование совместного движения ракеты-носителя и группировки каталогизированных космических объектов. Получены распределения количества сближений на расстояние менее 5 км по относительному расстоянию, относительной скорости и углу встречи. Оценена вероятность столкновения.

Ключевые слова: ракета-носитель, группировка каталогизированных космических объектов, совместное движение, вероятность столкновения, относительная скорость сближения, относительное расстояние сближения, угол встречи.

Mathematical modeling of mutual motion of a launch vehicle and a group of catalogued space objects has been carried out. Distributions of the number of approaches to the distance of less than 5 km as for relative distance, relative velocity and the angle of meeting have been obtained. The probability of a collision has been evaluated.

Key words: launch vehicle, group of catalogued space objects, mutual motion, probability of collision, relative velocity of approach, relative distance of approach, angle of meeting.

Введение. Инцидент, произошедший со спутником «Блиц», подтвердил необходимость учёта взаимных сближений летательного аппарата с околоземными космическими объектами (КО) искусственного происхождения в процессе выполнения миссии.

На данный момент группировка околоземных КО искусственного происхождения, по данным средств контроля космического пространства, уже превышает 15 тыс. единиц. В их состав входят космические аппараты (КА) как функционирующие, так и нет, орбитальные ступени ракет-носителей (РН) и обломки. Процентное соотношение между типами наблюдаемых КО приведено на рис. 1. Общая же численность КО, по некоторым оценкам, составляет более миллиона единиц с суммарной массой более тысячи тонн.

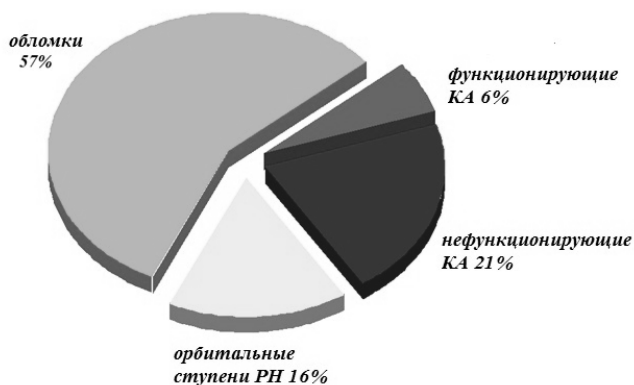


Рис. 1. Соотношение между типами наблюдаемых КО

Как можно видеть на рис. 1, большинство КО являются пассивными объектами, которые не могут выполнять операции по коррекции орбиты. Это так называемый космический мусор. Его распределение в околоземном пространстве не однородное; наиболее загрязнёнными областями являются орбиты высотой до 2100 км и наклонением 80–110 град. Кроме того, космический мусор способен численно увеличиваться за счёт процесса взаимных столкновений КО между собой, называемого синдромом Кesslera.

Космический мусор представляет опасность, подвергая риску удачность выполнения миссии не только пилотируемых полётов и функционирующих КА, но и РН, выводящих полезную нагрузку в околоземное космическое пространство.

Активные участки траекторий большинства РН проходят через область низких околоземных орбит, где наблюдается наибольшая концентрация космического мусора и могут произойти столкновения. Вероятность такого события мала (даже в сравнении с таковой для КА), но за счёт процессов развития синдрома Кesslera она будет постоянно возрастать.

Постановка задачи. Исходя из вышесказанного, в ближайшие десятилетия следует ожидать ухудшения проблемы безопасности пролёта РН через загрязнённые области околоземного космического пространства. Как следствие возникнет необходимость разработки и внедрения различных систем защиты, облик и область применения которых требуют знания вероятностных распределений параметров совместного движения РН и КО, таких как относительное взаимное расстояние, относительная скорость и угол встречи, а также вероятности столкновения.

Основные направления исследований, близких к рассматриваемому вопросу. В работе [5] предлагается аналитическая формула расчёта годовой вероятности столкновения между всеми каталогизированными и некаталогизированными КО:

$$P_C \approx 0,030 + 0,009 \frac{n_\Sigma}{n_P},$$

где n_Σ – суммарное число некаталогизированных КО различных размеров, учитываемых при расчёте вероятности столкновения; n_P – число каталогизированных КО.

Оценку вероятности столкновения МКС с каталогизированными космическими объектами предлагается проводить с использованием следующей формулы [7]:

$$P_C = \frac{1}{2\pi\sqrt{|C|}} \int_{area} \exp\left[-\frac{1}{2}(\bar{r} - \bar{r}_d)^T C^{-1}(\bar{r} - \bar{r}_d)\right] d\bar{r},$$

где C – матрица ковариации в плоскости столкновения; \bar{r}_d – номинальное относительное расстояние между МКС и КО.

- окно времён запуска РН;
- каталогизированная космическая обстановка.

Необходимо:

- определить распределения основных характеристик опасных сближений, таких как относительное расстояние, относительная скорость и угол встречи;
- оценить вероятность столкновения РН с КО в запуске.

Введем предположения:

- КО, высота перигея которых менее 120 км, не учитываются как прекратившие своё существование;
- космическая обстановка постоянна, то есть не появляются новые КО и не прекращают своё существование старые;
- РН и КО – материальные точки;
- движение РН происходит под воздействием сил тяги, притяжения Земли и аэродинамического сопротивления атмосферы;
- КО – пассивные объекты, не совершающие манёвров по поддержанию или изменению орбиты, движущиеся под воздействием сил притяжения Земли и аэродинамического сопротивления верхней атмосферы;
- функция распределения относительного расстояния между РН и КО – усечённая нормальная.

С учётом принятых допущений совместное движение группировки КО и РН будем рассматривать на участке от момента выхода последней из плотных слоёв атмосферы до момента отделения КА.

Под опасным будем понимать сближение РН с КО на относительное расстояние менее 5 км, а под опасным КО – объект, с которым выявлено опасное сближение.

Рассмотрим совместное движение РН и группировки КО, которое в детерминированной постановке описывается системой из $3N_{КО}$ алгебраических (где $N_{КО}$ – количество космических объектов) и $3N_{КО}$ дифференциальных уравнений

$$\left. \begin{aligned} \Delta \bar{V}_i &= \bar{V}_{РН} - \bar{V}_{КО_i} \\ \Delta \dot{\bar{R}}_i &= \Delta \bar{V}_i \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

где $\Delta \bar{V}$ – вектор относительной скорости сближения пары РН – КО; $\bar{V}_{РН}$ – вектор скорости РН; $\bar{V}_{КО}$ – вектор скорости КО; $\Delta \bar{R}$ – вектор относительного расстояния между РН и КО; $i \in \overline{1, N_{КО}}$ – номер пары РН – КО.

Вектор скорости РН, входящий в (1), определим из системы дифференциальных уравнений вида

$$\left. \begin{aligned} \dot{\bar{V}}_{РН} &= \dot{\bar{W}}_{РН} + \bar{g}_{РН} = (\bar{P}_{РН} + \bar{S}_{РН}) / m_{РН} + \bar{g}_{РН} \\ \dot{m}_{РН} &= -G_{РН} / g_0 \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

где $\bar{P}_{РН}$ – вектор силы тяги РН; $\bar{S}_{РН}$ – вектор аэродинамического сопротивления атмосферы, действующей на РН; $\bar{g}_{РН}$ – вектор ускорения силы притяжения Земли, действующей на РН; $m_{РН}$ – масса РН; $G_{РН}$ – весовой секундный расход компонентов топлива через двигательную установку РН; g_0 – ускорение силы притяжения Земли в точке старта.

Вектор скорости КО определим из дифференциального уравнения

$$\dot{\bar{V}}_{КО} = \bar{S}_{КО} / m_{КО} + \bar{g}_{КО}, \quad (3)$$

где $\bar{S}_{КО}$ – вектор аэродинамического сопротивления атмосферы, действующей на КО; $\bar{g}_{КО}$ – вектор ускорения силы притяжения Земли, действующей на КО.

В итоге совместное движение РН и группировки КО описывается системой (1) – (3) из $3N_{КО}$ алгебраических и $6N_{КО} + 4$ нелинейных дифференциальных уравнений в нормальной форме Коши, исследование которой аналитическим путём затруднительно. В связи с этим решение системы проведено путём компьютерного моделирования с использованием метода интегрирования Рунге – Кутты четвёртого порядка с постоянным шагом интегрирования.

Угол встречи пары РН – КО определим из выражения

$$\alpha = \arccos \left(\frac{\bar{V}_{РН} \cdot \bar{V}_{КО}}{|\bar{V}_{РН}| \cdot |\bar{V}_{КО}|} \right).$$

В качестве начальных условий движения приняты гипотетическая РН легко-го класса с точкой старта на экваторе, каталог космической обстановки NORAD от 20.06.13 г. и окно запуска с 00:00:00 21.06.13 г. по 00:00:00 22.06.13 г. Продолжительность окна запуска длительностью в сутки обусловлена необходимостью получения большего количества статистических данных при сравнительно низкой вероятности опасных сближений на активном участке траектории РН. Учитывая неравномерность распределения плотности потока КО от высоты орбиты и наклона, моделирование проводили для ряда траекторий выведения на солнечно-синхронные орбиты высотами до 2100 км.

По данным выбранного каталога, околоземная космическая обстановка описывается 17816 КО, 14026 из которых имеют начальные условия движения.

В результате решения системы (1) – (3) для выбранных начальных условий движения получены гистограммы распределения опасных сближений по высоте целевой орбиты и модулю относительной скорости (рис. 2), модулю относительного расстояния (рис. 3) и углу встречи (рис. 4). Статистические характеристики основных параметров опасных сближений приведены в табл. 1.

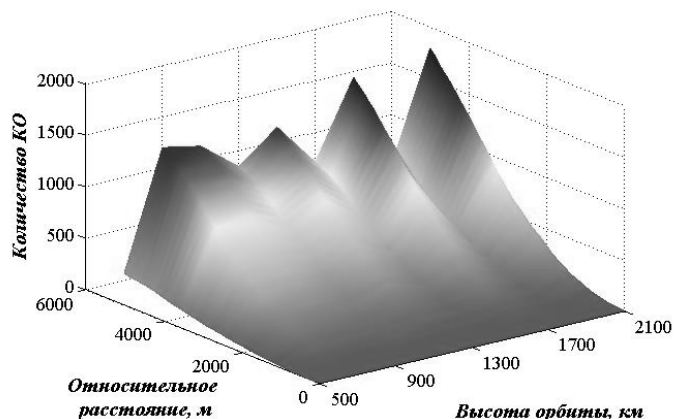


Рис. 2. Распределение опасных сближений по относительному расстоянию и высоте целевой орбиты РН

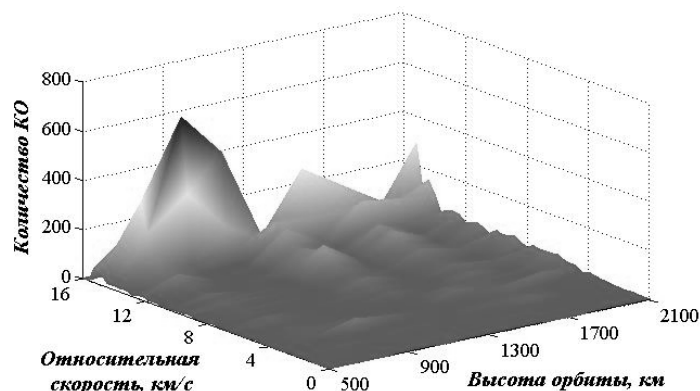


Рис. 3. Распределение опасных сближений по относительной скорости и высоте целевой орбиты РН

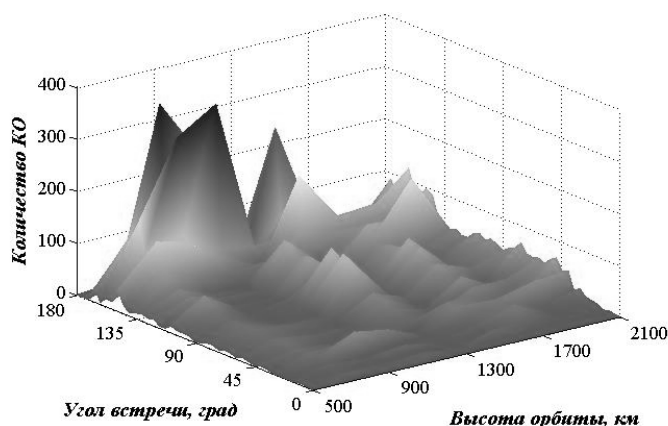


Рис. 4. Гистограмма распределения опасных сближений по углу встречи и высоте целевой орбиты РН

Таблица 1
Статистические характеристики основных параметров опасных сближений

Параметр	Минимальное относительное расстояние, м	Относительная скорость, км/с	Угол встречи, град
Математическое ожидание	3181	11,880	119,344
Среднее квадратическое отклонение	1133	3,576	46,098
Минимальное значение	38	0,154	0,804
Максимальное значение	5000	16,825	178,605

Из 750 тыс. промоделированных запусков выявлено три опасных сближения РН и КО на относительные расстояния менее 100 м, параметры которых приведены в табл. 2. Кроме того, выявлены три опасных сближения на высотах менее 300 км.

Таблица 2
Параметры сближения РН с КО на относительные расстояния менее 100 м

Минимальное относительное расстояние, м	Относительная скорость, км/с	Угол встречи, град	Высота полёта, км
38	9,3	77	883
69	14,5	152	692
76	13,9	136	712

Из полученных результатов следует, что наибольшее количество опасных сближений наблюдается на относительных скоростях более 10 км/с с углами встречи более 90 град. Следует обратить внимание, что корреляция между этими двумя параметрами составляет 0,97, что говорит о высокой зависимости между ними.

Рассмотрим оценку вероятности столкновения РН и КО в запуске. Столкновению с учётом предположений соответствует событие

$$|\Delta \bar{R}| \leq \Delta R_{MIN}, \quad (4)$$

где ΔR_{MIN} – предельно допустимое относительное расстояние сближения РН с КО.

Вероятности столкновения РН и КО соответствует вероятность выполнения неравенства (4):

$$P_C = P\left(|\Delta\bar{R}| \leq \Delta R_{MIN}\right) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}n\sigma} \int_0^{\Delta R_{MIN}} \exp\left[-\frac{(R-M)^2}{2\sigma^2}\right] dR, \quad (5)$$

где M – математическое ожидание; σ – среднее квадратическое отклонение; n – нормирующий коэффициент распределения.

Нормирующий коэффициент определяется выражением

$$n = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_0^{\infty} \exp\left[-\frac{(R-M)^2}{2\sigma^2}\right] dR.$$

Параметры распределения определим из распределения относительного расстояния сближения по всем рассматриваемым орбитам (рис. 5).

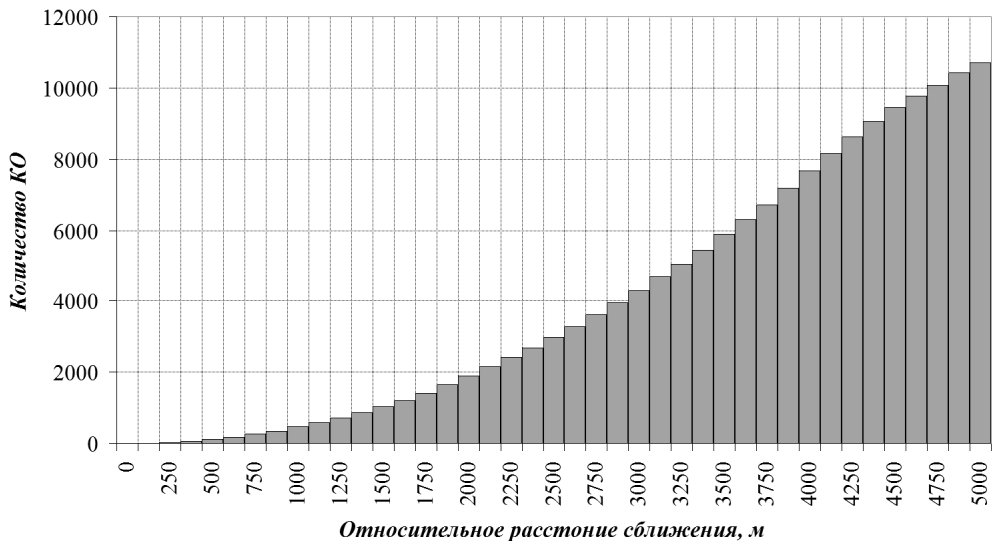


Рис. 5. Гистограмма распределения КО по относительному расстоянию сближения для всех рассматриваемых орбит

Выберем две характерные точки с координатами (предельно допустимое относительное расстояние сближения; количество КО) (100 м; 3) и (4000 м; 7681). Вероятность столкновения для каждого из рассматриваемых интервалов определяется соотношением

$$P = \frac{\omega}{\omega_{\Sigma}},$$

где ω – количество опасных сближений в заданном интервале относительных расстояний; $\omega_{\Sigma} = 777600$ – количество промоделированных траекторий РН. Вероятности столкновения для выбранных значений предельно допустимого относительного расстояния сближения составляют 4×10^{-6} и 10^{-2} соответственно.

С учётом предположения об усечённом нормальном распределении относительного расстояния определены параметры распределения относительного расстояния между РН и КО, которые приведены в табл. 3.

Таблица 3

Параметры распределения относительного расстояния между РН и КО

Параметр	Значение
Математическое ожидание, м	9154
Среднее квадратическое отклонение, м	2212
Нормирующий коэффициент, б/р	0,999982

На основаних отриманих параметрах розподілу проведена оцінка ймовірності зближення РН з КО в запуску на відносне відстань 1 м і 10 м, що складає 4×10^{-8} і 4×10^{-7} відповідно.

Совместно с исследованием процесса взаимных сближений РН и КО проанализированы оскулирующие параметры орбиты опасных КО. На основании полученных статистических данных построены гистограммы распределения количества КО по средней высоте, эксцентриситету и наклонению орбиты (рис. 6–8). Из полученных данных следует, что опасные сближения в основном происходят с КО, движущимися по орбитам со средней высотой 700 – 1100 км и наклонением 80 – 110 град.

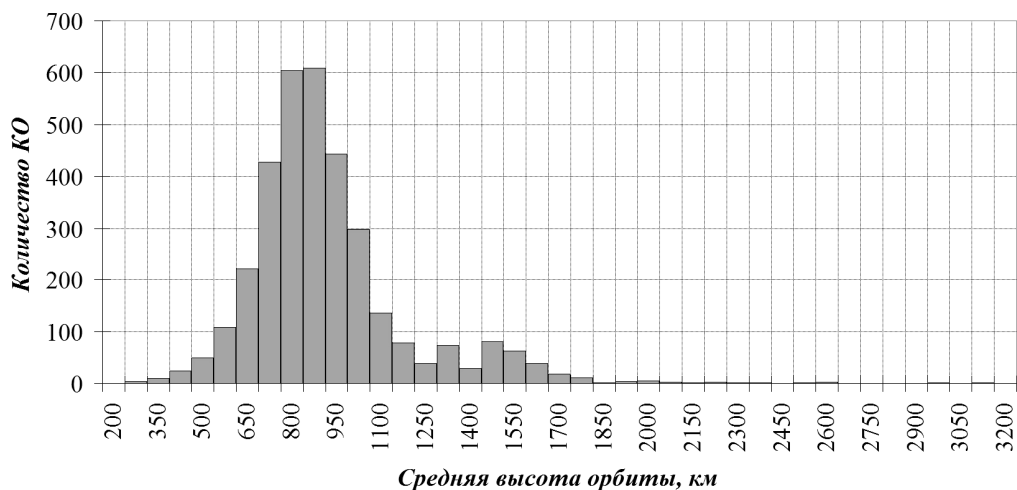


Рис. 6. Гистограма розподілу небезпечних КО по висоті орбіти

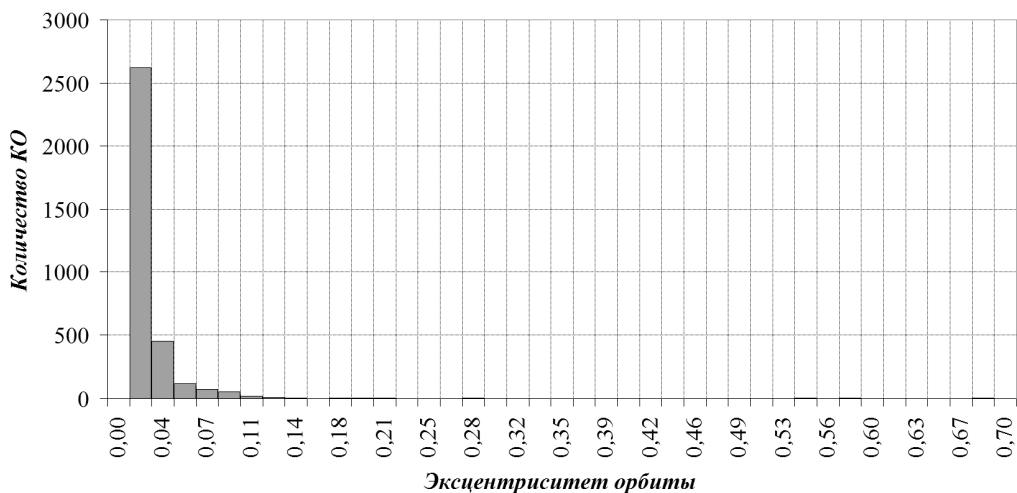


Рис. 7. Гистограма розподілу небезпечних КО по ексцентриситету орбіти

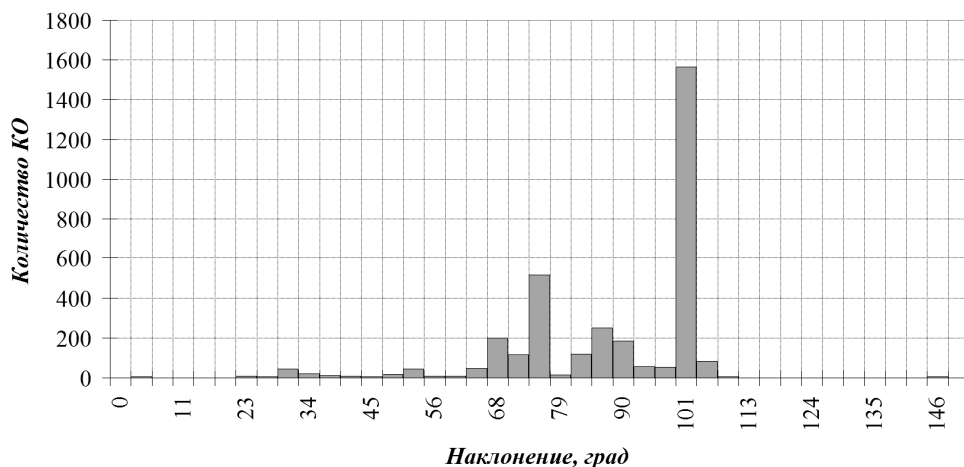


Рис. 8. Гистограмма распределения опасных КО по наклонению орбиты

Выводы. В результате проведенного исследования взаимных сближений РН и группировки КО можно сделать следующие выводы:

- распределение основных характеристик параметров сближения РН и КО имеет сложный характер, зависящий от высоты целевой орбиты РН, что говорит о неравномерности распределения КО по низкой околоземной орбите;
- большинство опасных сближений наблюдается на относительных скоростях более 10 км/с и углах встречи более 90 град;
- наибольшую опасность для полётов РН на солнечно-синхронные орбиты представляют КО, движущиеся на орбитах высотой 700–1000 км и наклонением 80–110 град;
- из более 750 тыс. промоделированных траекторий выявлено несколько сближений на относительные расстояния менее 100 м, что с учётом вероятностного характера совместного движения РН и КО может представлять существенную опасность для полёта РН и говорит о необходимости учёта состояния космической обстановки в процессе планирования миссий выведения;
- вероятность сближения РН с КО в запуске на расстояние менее 100 м составляет 4×10^{-6} , что почти в два раза меньше предельно допустимого значения вероятности столкновения МКС с космическим мусором, при котором станция совершает манёвр увода.

Необходимо обратить внимание на следующее. Коррекция времени запуска на несколько секунд влево или вправо позволяет избежать сближения на критические расстояния и существенно повысить вероятность безопасного пролёта РН через группировку околоземных КО. С другой стороны, развитие синдрома Кесслера в перспективе приведёт к невозможности запуска РН в любой момент времени, что говорит о необходимости разработки активных методов очистки околоземного космического пространства.

Исходя из этого надлежащее планирование момента запуска, в зависимости от состояния космической обстановки в районе траектории РН, может быть эффективным методом по увеличению вероятности безопасного пролёта РН через группировку КО, используемым совместно с активными методами очистки.

Библиографические ссылки

1. ГОСТ Р25645.167-2005. Космическая среда (естественная и искусственная). Модель пространственно-временного распределения плотности потоков техногенного вещества в космическом пространстве.

2. **Лабуткина Т. В.** Быстрый метод прогноза опасных сближений орбитальных объектов и оценки расстояния сближения / Т. В. Лабуткина, А. Н. Петренко // Системне проектування та аналіз характеристик аерокосмічної техніки. – Д. : Пороги, 2012. – Т. XIV. – С. 28–40.

3. **Лабуткина Т. В.** Методика прогноза механических конфликтов между элементами квазистабильного множества орбитальных тел / Т. В. Лабуткина // Системне проектування та аналіз характеристик аерокосмічної техніки. – Д. : Пороги, 2009. – Т. 9. – С. 41–52.

4. **Назаренко А. И.** Моделирование эволюции распределения техногенных частиц и объектов / А. И. Назаренко // Проблема загрязнения космоса (космический мусор). – 1993. – С. 114–126.

5. **Хуторовский З. Н.** Контроль космических объектов на низких высотах / З. Н. Хуторовский, В. Ф. Бойков, Л. Н. Пылаев // Околосемная астрономия (космический мусор). – М. : Космосинформ, 1998. – С. 34–101.

6. **Anz-Meador P.** GEO_EVOLVE 1.0: A Long-Term Debris Evolution Model for the Geosynchronous Belt [Електронний ресурс] / P. Anz-Meador, P. Krisko, M. Matney // Orbital Debris. Quarterly News. – 2000. – Vol. 5, Issue 4. – P. 5–7. – Режим доступу: <http://www.orbitaldebris.jsc.nasa.gov/newsletter/pdfs/ODQNv5i4.pdf>.

7. **Foster L.** International Space Station Debris Avoidance Operations [Електронний ресурс] / L. Foster, J. Frisbee, M. Wortham, and L. Howorth // Orbital Debris. Quarterly News. – 2001. – Vol. 6, Issue 2. – P. 4–5. – Режим доступу: <http://www.orbitaldebris.jsc.nasa.gov/newsletter/pdfs/ODQNv6i2.pdf>.

Надійшла до редколегії 08.09.2014 р.

УДК 678.02:621.365

И. А. Гусарова¹, Т. А. Манько²

¹*Государственное предприятие «Конструкторское бюро “Южное”
им. М. К. Янгеля»*

²*Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара*

ИЗУЧЕНИЕ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ СВОЙСТВ ТЕРМОСТОЙКИХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ВОЗВРАЩАЕМЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

На підставі експериментальних досліджень властивостей термостійких матеріалів при температурах 1100°C обрана для використання у теплозахисних конструкціях космічних апаратів, що повертаються, теплоізоляція на основі кремнеземних волокон.

Ключові слова: теплоізоляційні матеріали, оксидні волокна, космічні апарати, що повертаються.

На основании экспериментальных исследований свойств термостойких материалов при температурах 1100°C выбрана для использования в теплозащитных конструкциях возвращаемых космических аппаратов теплоизоляция на основе кремнеземных волокон.

Ключевые слова: теплоизоляционные материалы, оксидные волокна, возвращаемые космические аппараты.

On the basis of experimental studies of heat-resistant materials properties under the temperature of 1100°C heat insulation on the basis of silica fibers have been selected for application in thermo protection structures of reusable spacecraft.

Key words: heat-insulating materials, oxide fibers, reusable spacecraft.

Введение. Полеты первых возвращаемых космических аппаратов (КА) «Спейс Шаттл» и «Буран» с плиточными теплозащитными конструкциями (ТЗК)