

УДК 629.764

А.В. Голубек, Н.М. Дронь

Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара

СБЛИЖЕНИЕ ОРБИТАЛЬНОЙ СТУПЕНИ РАКЕТЫ-НОСИТЕЛЯ С КАТАЛОГИЗИРОВАННЫМИ КОСМИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ В ПРОЦЕССЕ УВОДА НА ПОВЕРХНОСТЬ ЗЕМЛИ

Проведене математичне моделювання сумісного руху орбітального ступеня

© А.В. Голубек, Н.М. Дронь, 2014

ракети-носія і угруповання каталогізованих космічних об'єктів на ділянці відведення з орбіти. Отримані розподіли кількості небезпечних космічних об'єктів від основних характеристик зближення з орбітальним ступенем. Розрахована ймовірність зближення на критичні відстані.

Ключеві слова: орбітальний ступень ракети-носія, угруповання каталогізованих космічних об'єктів, сумісний рух, імовірність зіткнення, відносна швидкість зближення, відносна відстань зближення, кут зустрічі, відведення з орбіти.

Проведено математическое моделирование совместного движения орбитальной ступени ракеты-носителя и группировки каталогизированных космических объектов на участке увода с орбиты. Получены распределения количества опасных космических объектов от основных характеристик сближения орбитальной ступенью. Рассчитана вероятность сближения на критические расстояния.

Ключевые слова: орбитальная ступень ракеты-носителя, группировка каталогизированных космических объектов, совместное движение, вероятность столкновения, относительная скорость сближения, относительное расстояние сближения, угол встречи, увод с орбиты.

Mathematical modeling of the joint motion of the orbiter and booster groups cataloged space objects in the area of the disposal. The distributions of the number of dangerous space objects from the basic characteristics of convergence orbital stages. Calculate the probability of convergence to the critical distance.

Keywords: orbiter launch vehicle, the grouping of cataloged space objects move together, the probability of collision, the relative speed of convergence, convergence of the relative distance, the angle of the meeting.

В данный момент средствами контроля космического пространства уже каталогизировано более 15 тысяч околоземных космических объектов (КО) искусственного происхождения. Около трёх с половиной тысяч из них – космические аппараты (КА) (менее тысячи функционирующих), около двух тысяч – орбитальные ступени ракет-носителей (ОСРН), остальные – обломки, образовавшиеся в результате столкновений и нештатных ситуаций. То есть, большинство каталогизированных КО представляют собой неуправляемые объекты, являющиеся так называемым космическим мусором. Большая его часть движется на низких околоземных орбитах, создавая тем самым проблемы

для безопасного выполнения миссии летательных аппаратов. Кроме того, космический мусор может увеличивать свою численность за счёт процесса взаимных столкновений КО между собой, называемого синдромом Кесслера. Согласно некоторым экспертным оценкам, синдром Кесслера уже начался, и в ближайшие десятилетия следует ожидать существенного увеличения численности КО. Как следствие, в таких условиях растёт вероятность столкновения КО как с функционирующими КА, так и с ОСРН, в том числе и на участке увода.

В свою очередь, эта проблема порождает задачу определения характеристик сближения и вероятности столкновения ОСРН с КО, необходимых для разработки и внедрения методов повышения вероятности безопасного пролёта ОСРН.

Основные направления исследований, близких к рассматриваемому вопросу. Работы [1-3] посвящены краткосрочному и долгосрочному прогнозу состояния группировки космического мусора. В работе [4] 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. Стандарт [5] предназначен для расчёта пространственно-временного распределения плотности потоков техногенного вещества в космическом пространстве. В работах [6, 7] предлагается оценка возможных механических конфликтов между орбитальными объектами. В статьях [8, 9] рассмотрены вопросы использования метода выбора момента запуска для повышения безопасности пролёта ракет через группировку КО.

Анализ решений и публикаций показал, что согласно доступным источникам оценок основных характеристик сближения ОСРН с группировкой КО в процессе увода на поверхность Земли, таких как относительное расстояние, относительная скорость, угол встречи и вероятность столкновения, не проводилось.

Сформулируем постановку задачи в следующем виде.

Даны:

- основные характеристики ОСРН в составе: массово-инерционных характеристик, характеристик двигательной установки, компоновочной схемы, циклограммы работы системы управления и угловых программ полёта;
- оскулирующие параметры орбиты в момент начала увода;
- каталогизированная космическая обстановка.

Необходимо:

- определить распределения параметров опасных сближений, таких как относительное расстояние, относительная скорость и угол встречи;
- оценить вероятность столкновения ОСРН с КО на участке увода.

Под опасным понимается сближение ОСРН и КО на минимальное относительное расстояние не превышающее 5 км.

Учитывая неравномерность распределения каталогизированных КО по околоземной орбите (большая часть всех объектов движутся по орбитам высотой до 2100 км и наклонением, 90-110 град), в качестве базовых для ОСРН приняты круговые солнечно-синхронные орбиты высотой от 500 до 2100 км. Кроме того, необходимо обратить внимание на малость вероятности опасного сближения ОСРН и КО, значение которой на несколько порядков ниже, чем для КА. Так, например, средствами контроля РФ и США за прошедшие четыре года зарегистрировано два столкновения КА с КО, в тоже время столкновений ОСРН на участке увода и КО на данный момент не зарегистрировано. В связи с вышесказанным, для получения большего количества статистических данных рассмотрено совместное движение ОСРН на активном участке и КО для значений аргумента широты ОСРН в пределах от 0 до 360 град.

Введем предположения:

- совместное движение ОСРН и группировки КО рассматривается в детерминированной постановке на участке от момента включения двигательной установки для увода до входа ступени в плотные слои атмосферы;
- космическая обстановка постоянна, то есть не появляются новые КО и не прекращают своё существование старые;
- ОСРН и КО – материальные точки;
- КО – пассивные объекты, не совершающие манёвров по поддержанию или изменению орбиты;
- распределение относительного расстояния сближения ОСРН и КО – усечённое нормальное;
- увод осуществляется по одноимпульсной схеме с использованием двигательной установки большой тяги.

Рассмотрим совместное движение системы ОСРН – группировка КО, которое с учётом принятых предположений описывается системой из $6N_{КО}$ алгебраических уравнений (где $N_{КО}$ количество космических объектов) и $(6N_{КО} + 7)$ дифференциальных уравнений вида

$$\begin{aligned}
 \Delta \bar{R}_i &= \bar{R}_{OC} - \bar{R}_{KO_i}, & \Delta \bar{V}_i &= \bar{V}_{OC} - \bar{V}_{KO_i}, \\
 \dot{\bar{V}}_{OC} &= \dot{\bar{W}}_{OC} + \bar{g}_{OC}, & \dot{\bar{R}}_{OC} &= \bar{V}_{OC}, \\
 \dot{m}_{OC} &= \dot{G}_{OC} / g_0, \\
 \dot{\bar{V}}_{KO_i} &= \dot{\bar{W}}_{KO_i} + \bar{g}_{KO_i}, & \dot{\bar{R}}_{KO_i} &= \bar{V}_{KO_i}, \quad i = \overline{1, N_{КО}},
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

где $\overline{\Delta R}$ и $\overline{\Delta V}$ – векторы относительного расстояния и скорости между ОСРН и КО; \overline{R}_{OC} и \overline{V}_{OC} – векторы текущего положения и скорости ОСРН в инерциальной системе координат; \overline{R}_{KO} и \overline{V}_{KO} – векторы текущего положения и скорости КО в инерциальной системе координат; \overline{W}_{OC} – вектор кажущейся скорости ОСРН, \overline{g}_{OC} – вектор ускорения силы притяжения Земли в центре масс ОСРН; m_{OC} – масса ОСРН; \dot{G}_{OC} – весовой секундный расход; g_0 – ускорение силы притяжения Земли в точке старта; \overline{W}_{KO} – вектор кажущейся скорости КО, \overline{g}_{KO} – вектор ускорения силы притяжения Земли в центре масс КО.

Ввиду нелинейности системы дифференциальных уравнений (1), её решение проведено численным методом с использованием компьютерного моделирования. В качестве начальных условий движения КО выбран каталог NORAD от 20.06.13 г и окно увода с 00:00:00 21.06.13 по 00:00:00 22.06.13. По данным каталога на околоземных орбитах движется 17816 КО, по 14026 из которых имеются начальные условия движения.

В результате компьютерного моделирования совместного движения гипотетической ОСРН и группировки КО получены гистограммы распределения основных параметров опасных сближений: минимального относительного расстояния (рис. 1), относительной скорости (рис. 2) и угла встречи (рис. 3). Статистические данные распределений приведены в табл. 1.

Таблица 1

Статистические данные характеристик сближения ОСРН и КО

	Математическое ожидание	Среднее квадратическое отклонение
Минимальное относительное расстояние, м	3243	3027
Относительная скорость, м/с	12302	3099
Угол встречи, град	124	44



Рис. 1. Распределение количества опасных КО по минимальному относительному расстоянию сближения



Рис. 2. Распределение количества опасных КО по относительной скорости сближения

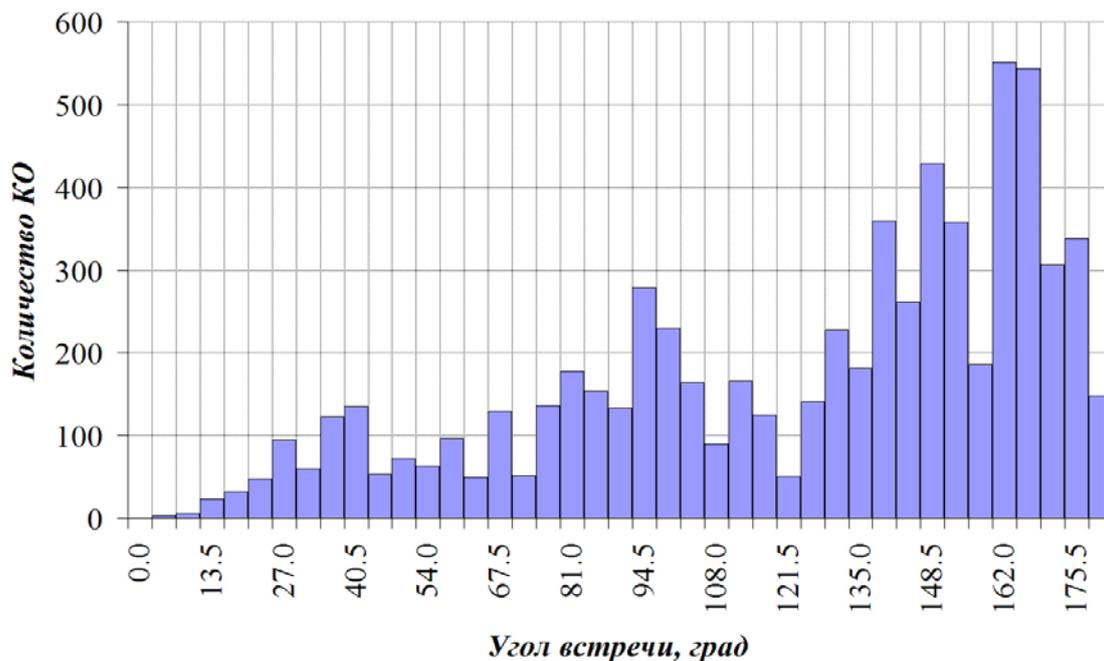


Рис. 3. Гистограмма распределения количества опасных КО по углу встречи

Из 750 тысяч промоделированных траекторий выявлено одно опасное сближение ОСРН с КО на относительные расстояния менее 100 м, параметры которого приведены в табл. 2.

Анализ распределения оскулирующих параметров орбит опасных КО (рис. 4 и рис. 5) показал, что наибольшее их число движется по орбитам со средней высотой 800-100 км и наклоном 90-100 град, где и наблюдается наибольшая концентрация КО. При этом корреляция между распределением опасных КО с распределением всех КО по высоте орбиты составляет 0,98.

Таблица 2

Параметры сближения ОСРН с КО на относительные расстояния менее 100 м

Минимальное относительное расстояние, м	Относительная скорость, км/с	Угол встречи, град	Высота полёта, км
86	11,2	92	801

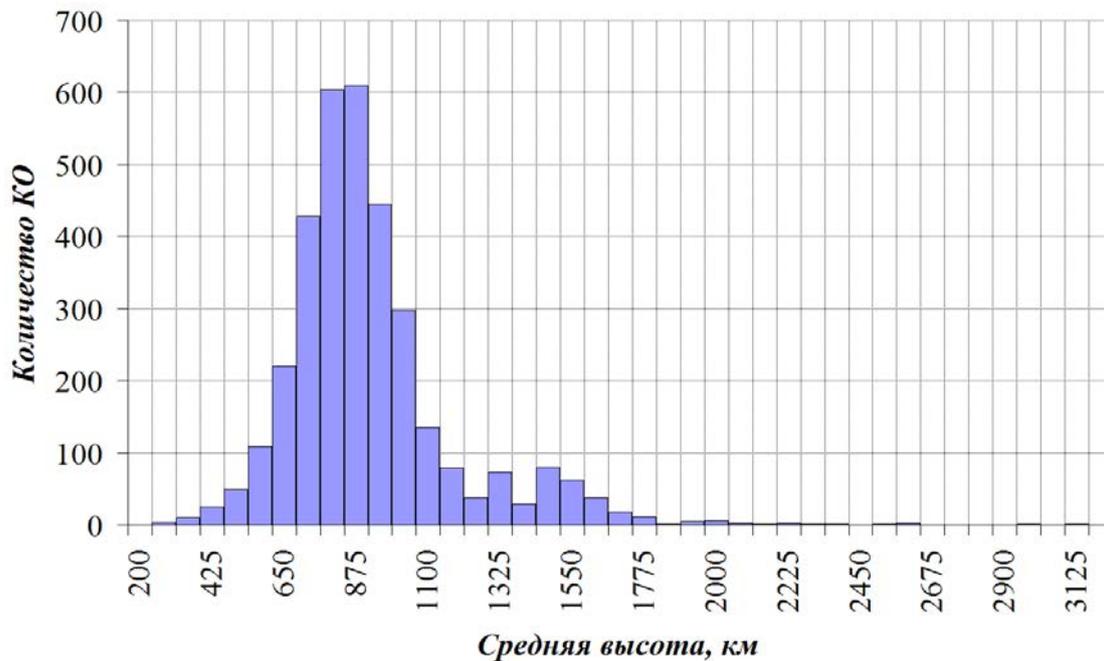


Рис. 4. Гистограмма распределения количества опасных КО по высоте орбиты

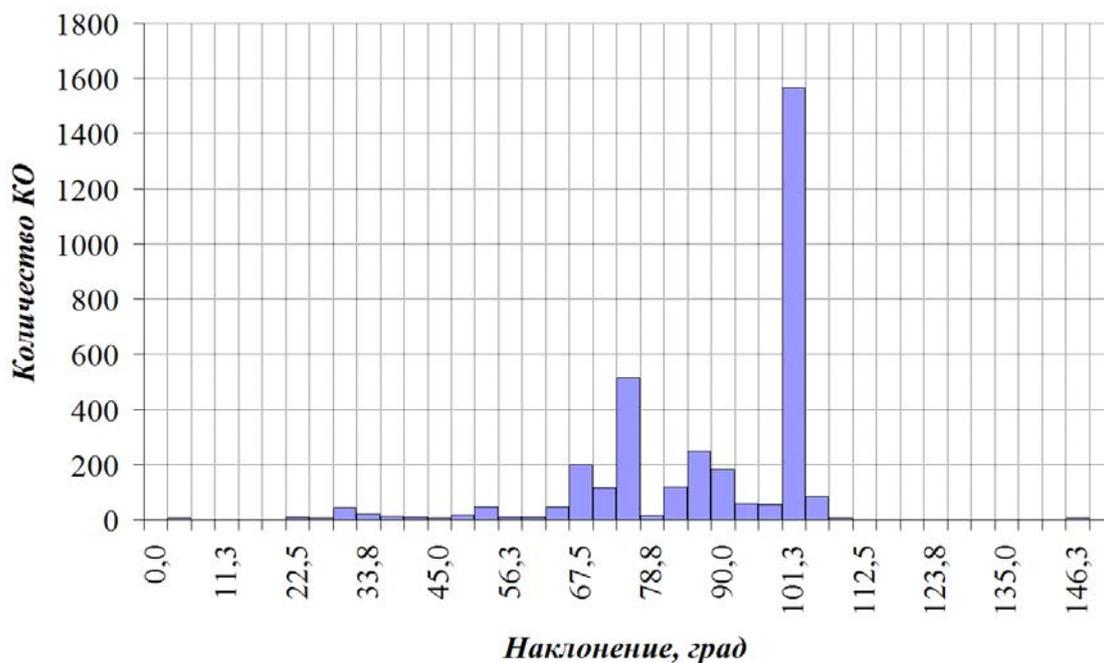


Рис. 5. Гистограмма распределения количества опасных КО по наклонению орбиты

Столкновению ОСРН и КО на участке увода с учётом предположений соответствует событие

$$|\Delta\bar{R}| \leq \Delta R_{\min}, \quad (2)$$

где $\Delta\bar{R}$ – вектор относительного расстояния сближения ОСРН с группировкой КО; ΔR_{\min} – вектор предельно допустимого относительного расстояния сближения ОСРН с группировкой КО.

При этом вероятность столкновения с учётом принятого предположения об усечённом нормальном распределении относительного расстояния сближения будет представлять собой вероятность выполнения равенства (2)

$$P_C = P(|\Delta\bar{R}| \leq \Delta R_{\min}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}n\sigma} \int_0^{\Delta R_{\min}} \exp\left[-\frac{(R-M)^2}{2\sigma^2}\right] dR, \quad (3)$$

где M – математическое ожидание (МО); σ – среднее квадратическое отклонение (СКО); n – нормирующий коэффициент распределения, определяемый выражением

$$n = 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{-\infty}^0 \exp\left[-\frac{(R-M)^2}{2\sigma^2}\right] dR.$$

Параметры распределения определим из распределения относительного расстояния сближения по всем рассматриваемым орбитам (рис. 6).

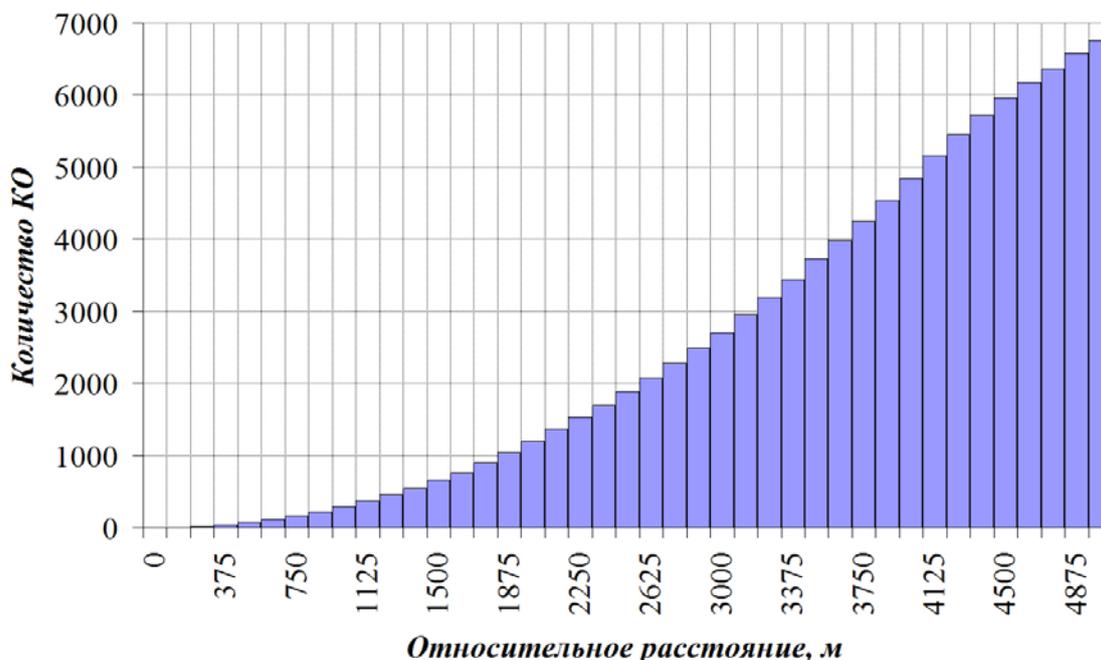


Рис. 5. Гистограмма распределения количества опасных КО по относительному расстоянию сближения

Для определения параметров распределения с учётом предположения о нормальности распределения относительного расстояния выберем две характерные точки с координатами (относительное расстояние; количество КО) (100 м; 1) и (4000 м; 4848). Вероятности сближения в данных точках составляют $1,3 \cdot 10^{-6}$ и $6,2 \cdot 10^{-3}$ соответственно. Соответствующие выбранным точкам параметры распределения составляют: МО – 9239 м, СКО – 2097 м; нормирующий коэффициент – 0,999995. Согласно полученным параметрам распределения вероятность сближения в процессе увода на относительные расстояния 1 м и 10 м будет составлять 10^{-8} и 10^{-7} соответственно.

В результате анализа полученных результатов исследования можно сделать следующие выводы:

- распределение основных характеристик параметров сближения ОСРН и КО имеет сложный характер, большинство опасных сближений наблюдается на относительных скоростях более 10 км/с и углах встречи более 90 град;

- наибольшую опасность для полёта ОСРН на солнечно-синхронную орбиту представляют КО, движущиеся на орбитах высотой 800-1000 км и наклоном 90-110 град;

- из 750 тысяч промоделированных траекторий выявлено несколько сближений на относительные расстояния менее 100 м, что с учётом вероятностного характера совместного движения ОСРН и КО может представлять существенную опасность для безопасного полёта ступени и говорит о необходимости учёта состояния космической обстановки в процессе планирования миссий увода;

- вероятность сближения ОСРН с КО в процессе увода на расстояние менее 100 м составляет $1,3 \cdot 10^{-6}$, что соизмеримо с предельно допустимым значением вероятности столкновения Международной космической станции с космическим мусором.

Полученные результаты говорят о том, что в процессе очистки околоземного космического пространства посредством увода выполнивших свою миссию ОСРН возможны столкновения последней с КО, которые приведут к ещё большему загрязнению. При этом саму миссию увода необходимо осуществлять с учётом состояния текущей космической обстановки в районе траектории полёта ОСРН.

Следует обратить внимание на тот факт, что для исключения сближения на критическое расстояние достаточно сместить момент времени начала увода на несколько секунд вправо или влево. Исходя из этого можно сказать, что соответствующий выбор времени начала увода в зависимости от состояния космической обстановки в районе траектории ОСРН может на первых порах быть эффективным способом повышения безопасности её полёта через группировку КО.

Библиографические ссылки

1. Instability of the Current Orbital Debris Population // Orbital Debris. Quarterly News. – 2006. – Volume 10. – Issue 2. – P. 1–2. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.orbitaldebris.jsc.nasa.gov/newsletter/pdfs/ODQNv10i2.pdf>.
2. Liou J.-C. Collision Activities in the Future Orbital Debris Environment / J.-C. Liou // Orbital Debris. Quarterly News. – 2004. – Volume 8. – Issue 4. – P. 8. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.orbitaldebris.jsc.nasa.gov/newsletter/pdfs/ODQNv8i4.pdf>.
3. Liou J.-C. Instability of the Present LEO Satellite Populations / J.-C. Liou & N. Johnson // Orbital Debris. Quarterly News. – 2006. – Volume 10. – Issue 3. – P. 7. [Электронный ресурс] – Режим доступа к журналу: <http://www.orbitaldebris.jsc.nasa.gov/newsletter/pdfs/ODQNv10i3.pdf>.
4. Хуторовский З.Н. Контроль космических объектов на низких высотах / З.Н. Хуторовский, В.Ф.Бойков, Л.Н. Пылаев // Околоземная астрономия (космический мусор). – М.: Космосинформ, 1998. С. 34 – 101.
5. ГОСТ Р25645.167–2005 Космическая среда (естественная и искусственная) Модель пространственно-временного распределения плотности потоков техногенного вещества в космическом пространстве.
6. 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. IX. С. 41 – 52.
7. 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.
8. Заволока А.Н. К определению безопасных «окон запуска» космических аппаратов / А.Н. Заволока, П.Г. Хорольский // Техническая механика. – 2000. – № 2. – С. 33 – 38.
9. Голубек А.В. Методика оптимизации окон запуска ракет-носителей / А.В. Голубек, В.В. Авдеев, В.А. Ларин // Техническая механика. – 2009. – № 2. – С. 114 – 120.

Надійшла до редколегії 3.07.2014