УДК 629.7

А. П. АЛПАТОВ, Ю. М. ГОЛЬДШТЕЙН

ВЫБОР ОРБИТ ДЛЯ УТИЛИЗАЦИИ КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА

Институт технической механики
Национальной академии наук Украины и Государственного космического агентства Украины,
ул. Лешко-Попеля, 15, 49005, Днепр, Украина; e-mail: aalpatov@ukr.net; jura_gold@meta.ua

Дедалі більше техногенне забруднення навколоземного космічного простору фрагментами космічного сміття різного розміру істотно обмежує можливості реалізації космічної діяльності і становить велику небезпеку для об'єктів на Землі. Особливо сильно засмічені низькі орбіти з висотами до 2000 км. Актуальність забезпечення безпеки космічних польотів в умовах техногенного забруднення навколоземного космічного простору та зниження небезпеки для об'єктів на Землі при неконтрольованому входженні космічних об'єктів в щільні шари атмосфери і їх падінні на Землю стрімко зростає. У зв'язку із цим доцільно видаляти фрагменти космічного сміття з області робочих орбіт. В даний час в якості перспективних способів видалення космічного сміття розглядаються: прямий спуск з орбіти, переміщення на орбіту з терміном існування менше двадцяти п'яти років, переміщення на орбіту поховання і орбітальна утилізація. Відповідно до концепції орбітальної утилізації космічне сміття розглядається в якості ресурсу індустрії на орбіті. Метою статті є оцінка перспектив орбітальної утилізації космічного сміття і розробка методики вибору кількості та просторового розміщення безпечних орбіт утилізації в області низьких навколоземних орбіт. У статті розглянуто і проаналізовано сучасні підходи до очищення навколоземного космічного простору від техногенного забруднення та математичні моделі засміченості навколоземного космічного простору. Розроблено методику визначення та визначено області можливого просторового розміщення безпечних орбіт утилізації космічного сміття. Оцінено енергетичні витрати переведення космічного сміття з вихідних орбіт на орбіти утилізації. Новизна отриманих результатів полягає в запропонованій методиці вибору й отриманих рекомендаціях щодо вибору кількості і просторового розміщення орбіт утилізації космічного сміття. Отримані результати можуть знайти застосування при плануванні орбітальної утилізації космічного сміття.

Возрастающее техногенное загрязнение околоземного космического пространства фрагментами космического мусора различного размера существенно ограничивает возможности реализации космической деятельности и представляет большую опасность для объектов на Земле. Особенно сильно засорены низкие орбиты с высотами до 2000 км. Актуальность обеспечения безопасности космических полетов в условиях техногенного загрязнения околоземного космического пространства и снижения опасности для объектов на Земле при неконтролируемом вхождении космических объектов в плотные слои атмосферы и их падении на Землю стремительно растет. В связи с этим целесообразно удалять фрагменты космического мусора из области рабочих орбит. В настоящее время в качестве перспективных способов удаления космического мусора рассматриваются: прямой спуск с орбиты, перемещение на орбиту со сроком существования менее двадцати пяти лет, перемещение на орбиту захоронения и орбитальная утилизация. В соответствии с концепцией орбитальной утилизации космический мусор рассматривается в качестве ресурса индустрии на орбите. Целью статьи является оценка перспектив орбитальной утилизации космического мусора и разработка методики выбора количества и пространственного размещения безопасных орбит утилизации в области низких околоземных орбит. В статье рассмотрены и проанализированы современные подходы к очистке околоземного космического пространства от техногенного загрязнения и математические модели засоренности околоземного космического пространства. Разработана методика определения и определены области возможного пространственного размещения безопасных орбит утилизации космического мусора. Оценены энергетические затраты перевода космического мусора с исходных орбит на орбиты утилизации. Новизна полученных результатов состоит в предложенной методике выбора и полученных рекомендациях по выбору количества и пространственного размещения орбит утилизации космического мусора. Полученные результаты могут найти применение при планировании орбитальной утилизации космического мусора.

The increasing technogenic pollution of near-Earth space with space debris fragments of various sizes significantly limits the possibilities for space activity and is a great threat to objects on the Earth. Low orbits with altitudes up to 2,000 km are the most heavily polluted. The urgency of ensuring space flight safety in conditions of the technogenic pollution of near-Earth space and reducing the threat to objects on the Earth from the uncontrolled entry of space objects into the dense atmosphere and their fall to the Earth is rapidly growing. In accordance with the guidelines of the Inter-Agency Space Debris Coordination Committee, space debris fragments must be removed from the area of operational orbits. Currently, the following methods are considered as promising ways to remove space debris: a direct descent from the orbit, a transfer to an orbit with a life shorter than twenty-five years, a transfer to a burial orbit, and in-orbit utilization. In accordance with the concept of in-orbit utilization, space debris is considered as a resource for the in-orbit industry. The aim of this paper is to assess the prospects for space debris in-orbit utilization and to develop a technique for choosing the number and spatial location of safe low-Erath utilization orbits. The paper overviews and analyzes modern approaches to cleaning near-Earth space from space debris and mathematical models of near-Earth space pollution. The technique developed made it possible to identify possible areas for safe space debris utilization orbits. The energy consumption for transferring space debris objects from their original orbits to utilization ones is estimated. What is new is the technique and recommendations for the choice of the number and spatial location of space debris utilization orbits. The results obtained may be applied in planning the in-orbit utilization of space debris.

Ключевые слова: *космический мусор, удаление, захоронение, утилизация, математическое моделирование.*

Введение. В настоящее время околоземное космическое пространство (ОКП) существенно засорено неработающими космическими аппаратами, разгонными блоками (РБ), последними ступенями ракет-носителей (РН) и операционными элементами. Эти космические объекты (КО) являются космическим мусором (КМ) различного размера. По данным Каталога Космического агентства США на февраль 2018 года было зарегистрировано примерно 17000 наблюдаемых КО техногенного происхождения. По данным Европейского космического агентства общая масса КМ составляет примерно 7000 тонн. Каталогизированные объекты, находящиеся в ОКП, состоят из: космических аппаратов (КА) – 20 % (из которых 6 % работающие), ступеней РН и РБ – 11%, операционных элементов – 5 %, фрагментов разрушившихся КО – 64 %. [1].

Особенно сильно засорены низкие орбиты с высотами до 2000 км. В области низких околоземных орбит содержится 77 % от общего числа каталогизированных объектов. Все КО подразделяются на две категории: наблюдаемые, размером более 10 см – 20 см, и ненаблюдаемые, размером менее 10 см – 20 см. Причем основное засорение ОКП создают ненаблюдаемые КО, которых существенно больше, чем наблюдаемых. Постоянно проводимые наблюдения показывают, что засорение ОКП КО непрерывно растет.

Современное состояние засоренности ОКП. Базовой характеристикой КМ является концентрация – среднее число объектов в единице объема. Другой важной характеристикой является плотность потока КМ относительно КА. Физический смысл плотности потока частиц – это число столкновений с КМ сферического объекта с единичной площадью сечения за единицу времени. Источниками экспериментальных данных о каталогизированных КО являются Американская и Российская Системы контроля космического пространства (СККП). Данные Американской СККП частично доступны на сайте http://www.space-track.org, а информация Российской СККП имеет закрытый характер.

Степень засорения низкоорбитальной области ОКП (высоты орбит 400 км – 2500 км) каталогизированными КО наглядно иллюстрируют представленные на рисунках 1, 2 графики распределения количества орбит каталогизированных КО в 100-километровых слоях по высоте и в 5-градусных областях по наклонению. Графики построены с использованием данных каталога NORAD от 12.02.2018 г.

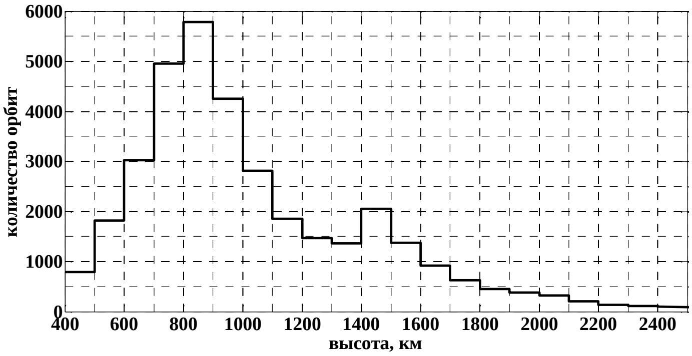

Рис. 1 – Распределение количества орбит каталогизированных КО по высоте

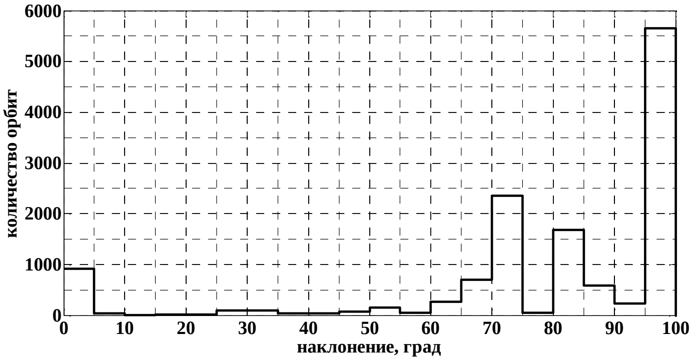

Рис. 2 – Распределение количества орбит каталогизированных КО по наклонению

Из приведенных графиков видно, что абсолютный максимум концентрации орбит наблюдаемых КО по высоте достигается в интервале высот 800 км – 900 км. Второй достаточно четко выраженный (локальный) максимум приходится на высоты 1400 км – 1500 км. Абсолютный максимум концентрация орбит КО по наклонению достигается на интервале наклонений 95°– 100°. Локальные максимумы наблюдаются на интервалах 0°– 5°, 70 – 75° и 80°– 85°.

Анализ математических моделей засоренности ОКП. Модели засоренности космического пространства предназначены для описания эволюции пространственно-временного распределения КМ в зависимости от их размеров и других физических параметров. В настоящее время используются детерминистские, статистические или комбинированные модели.

При оценке общего уровня засоренности ОКП учитываются не только известные (каталогизированные) объекты, но и объекты, находящиеся в настоящее время на орбите, но не каталогизированные по различным причинам. Граница минимальных размеров каталогизированных КО в области высот до 2000 км находятся в диапазоне 10 см – 20 см. Данные о числе и других характеристиках КО меньшего размера определяются в процессе моделирования КМ, так как имеющейся экспериментальной информации о мелком (ненаблюдаемом) КМ очень мало. При построении моделей пространственно-временного распределения КМ наряду с экспериментальными данными широко используются статистические подходы, различные модели столкновений и фрагментации КО, а также дополнительная априорная информация.

При моделировании КМ рассматривается два типа столкновений КО: катастрофические и некатастрофические, соответственно характеризующиеся полным разрушением или повреждением КО. Условием катастрофического столкновения принято считать столкновения с удельной энергией соударения большей 35 Дж/г – 45 Дж/г [2], [3].

В настоящее время для оценки концентрации, плотности потока наблюдаемых и ненаблюдаемых частиц КМ и вероятности их столкновений с КА широко используются три модели КМ [3], [4]: модель NASA ORDEM-2000, модель ESA MASTER-2009 и российская модель SDPA-2009.

Данные о параметрах КМ, содержащиеся в разных моделях, часто заметно отличаются. Это обстоятельство связано с тем, что разработчики моделей зачастую работали с информацией, к которой доступ ограничен, а также с информацией, получаемой из разных источников наблюдений и отличающейся по качеству и объему. Вместе с тем, выявленные на основе моделей принципиальные особенности и тенденции вполне согласуются качественно.

Таблица 1 – Основные характеристики моделей космического мусора

Модель	MASTER-2009	ORDEM-2000	SDPA-2009
Высоты, км	200 – 38800	200 – 2000	300 – 2000 35400 – 36200
Минимальный размер КМ, м	0,001	0,001	0,006
Концентрация	Определяется	Определяется	Определяется
Удельный поток относительно КА	Определяется	Определяется	Определяется
Относительная скорость	Определяется	Определяется	Определяется
Подход	Смешанный	Смешанный	Стохастический

Модели КМ позволяют для заданной орбиты движения КО с поперечным сечением S получить оценку среднегодовой вероятности его столкновений $P(S, d_1, d_2)$ с фрагментами КМ, размеры которых содержатся в интервале (d_1, d_2). Для оценки вероятности столкновений КО с КМ используется распределение Пуассона:

$$P(S, d_1, d_2, N) = 1 - \exp(-N), \tag{1}$$

где P – среднегодовая вероятность столкновений КО с КМ при движении по заданной орбите, N – среднее число столкновений КО с КМ.

Для определения среднего числа столкновений $N(d_1, d_2)$ в основном используются статистические методы. Их применение обусловлено тем, что для некаталогизированных фрагментов КМ могут быть заданы только распределения размера, массы и орбитальных параметров. В основе статистических методов лежит методика Д. Кесслера [3] – [4], определяющая среднее число столкновений $N(d_1, d_2)$ по формуле:

$$N(d_1, d_2) = S \rho V_{rel} \Delta t, \tag{2}$$

где S – сечение КО; $\rho(d_1, d_2)$ – средняя концентрация КМ; V_{rel} – средняя относительная скорость КО и КМ; Δt – интервал времени движения по орбите.

Перечисленные модели базируются на большом количестве файлов данных, заранее подготовленных разработчиками с использованием специализированных программ. Для решения прикладных задач в виде компьютерных программ и нормативных документов общедоступна модель ESA MASTER-2009 [5]. Доступ к другим моделям в настоящее время ограничен.

Современные подходы к очистке ОКП от КМ. Актуальность задач обеспечения безопасности космических полетов в условиях техногенного загрязнения околоземного космического пространства и снижения опасности для объектов на Земле при неконтролируемом вхождении космических объектов в плотные слои атмосферы и их падении на Землю стремительно растет. В связи с этим целесообразно удалять фрагменты космического мусора из области рабочих орбит.

Для борьбы с КМ используются конструктивные меры предотвращения загрязнения ОКП, а также активные и пассивные методы удаления КМ с орбит. Согласно результатам проведенных научных исследований [7], удаление от 3 до 5 больших объектов в год с низких околоземных орбит является единственным эффективным способом предотвращения цепной реакции роста количества объектов КМ в будущем.

Как правило, рассматриваются два вида зон увода КМ: орбиты в более высоком высотном слое, где КМ может находиться сотни лет, и низкие орбиты, куда КМ переводится для последующего его сгорания при входе в плотные слои атмосферы. Причем увод в атмосферу КМ с высоких орбит требует больших энергетических затрат.

В настоящее время в качестве перспективных рассматриваются следующие способы удаления КМ с орбиты:

– спуск в плотные слои атмосферы Земли;

– перемещение на такую орбиту, с которой под влиянием сопротивления атмосферы и других возмущений КМ будет устранен в течение двадцати пяти лет;

– перемещение в один из районов захоронения, в котором КМ не будет препятствовать осуществлению будущих космических проектов.

Концепция утилизации КМ. В настоящее время на космических орбитах по разным оценкам находится порядка 7000 тонн КО, содержащих в своих конструкциях дорогостоящие материалы. По имеющимся оценкам, стоимость выведения одного килограмма массы на высокую орбиту может превышать 10 тыс. долларов США.

В связи с изложенным имеет смысл рассмотреть существующий КМ в качестве одного из видов ресурсов ближнего космоса [8], [9]. Предполагается, что некоторая часть КМ может быть складирована и переработана прямо на орбите. Предложенный взгляд на КМ приводит к необходимости его утилизации для последующего использования. В этом случае возникает задача выбора количества и пространственного размещения безопасных орбит долговременного хранения утилизированного КМ. Использование нескольких орбит для утилизации не представит существенной угрозы для функционирующих КА.

Решение задачи утилизации КМ можно представить в виде двух последовательно выполняемых этапов.

На первом этапе формируются группы фрагментов КМ, близких с точки зрения возможности их утилизации на одной орбите. Для формирования этих групп целесообразно использовать методы кластерного анализа с энергетической метрикой. На втором этапе проводится выбор орбит утилизации. В качестве возможных орбит утилизации предлагается использовать околокруговые орбиты.

Первоначальный отбор орбит утилизации предлагается проводить по критерию минимальности среднегодовой вероятности катастрофического столкновения утилизируемого КО с КМ. Для отобранных орбит необходимо оценить их устойчивость на длительном временном интервале и энергетические затраты перевода КО на эти орбиты. В случае удовлетворения ограничениям, отобранные орбиты могут использоваться в качестве орбит утилизации.

Утилизация КМ предполагает разработку дешевых технологий его сбора и сохранения на орбитах. Одна из возможных технологий утилизации предусматривает использование активного КА, который после захвата очередного КО уводит его на орбиту утилизации. Через некоторое время он возвращается за новым КО. Продолжительность нахождения активного КА на орбите утилизации определяется разностью скоростей прецессии плоскости орбиты утилизации и плоскости орбиты следующего утилизируемого КО. Перелет осуществляется в момент примерного совпадения долготы восходящего узла орбиты утилизации и орбиты утилизируемого объекта.

Ниже представлены результаты проведенных исследований по выбору орбит утилизации в области низких околоземных орбит. При проведении исследований использовались высокоточный программный комплекс MASTER 2009 и DRAMA 2.0.2 [5], [6].

Выбор орбит утилизации. Выбор орбит утилизации проводился с использованием прогнозируемых значений среднегодовой вероятности катастрофического столкновения утилизированного КО с КМ. Для прогнозирования использовался комплекс программ [5], [6]. Расчеты проводились для семейства околокруговых орбит с эксцентриситетом 0,0001 и дискретно изменяющимися высотой и наклонением орбиты. Долгота восходящего узла и параметра перигея не варьировались. Проведенные оценочные расчеты показали, что вариация этих параметров практически не оказывает влияния на среднегодовую вероятность катастрофических столкновений утилизируемого КО с КМ. Шаг изменения высоты орбиты составлял 100 км, а наклонения орбиты выбирались в интервалах максимумов концентрации каталогизированных объектов по наклонению и имели значения 2°, 72°, 82° и 98°. При проведении расчетов предполагалось, что размеры КМ содержатся в интервале от 0,01 м до 30 м, площадь поперечного сечения утилизированного КО $S = 5\text{м}^2$, масса утилизированного КО $m = 500$ кг, удельная энергия катастрофического разрушения – 40 дж/г., коэффициент лобового сопротивления утилизированного КО $c_x = 2{,}2$. Результаты расчетов среднегодовой вероятности катастрофических столкновений утилизированного КО с КМ представлены на рисунке 3.

Из графиков на рисунке 3 видно, что кривые среднегодовой вероятности катастрофических столкновений для рассмотренных наклонений имеют подобный характер. Абсолютный максимум среднегодовой вероятности катастрофических столкновений по высоте достигался в интервале высот 700 км – 900 км. Второй и третий достаточно четко выраженные (локальные) максимумы приходятся на высоты 1400 км – 1500 км и 1700 км. Локальные минимумы достигаются на высотах 1100 км – 1300 км и на высотах больше 1800 км.

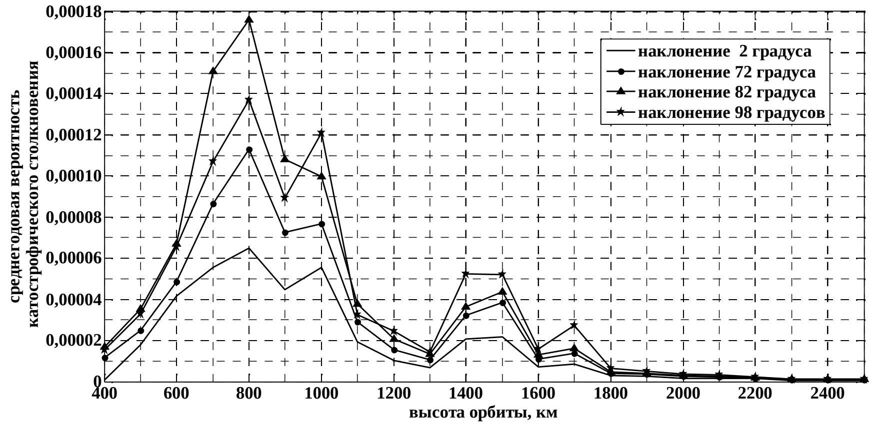

Рис. 3 – Оценка вероятности катастрофических столкновения КО с КМ

На основе проведенного анализа в качестве возможных орбит утилизации КО предлагается выбирать орбиты с наклонениями 2°, 72°, 82° и 98° в высотных слоях 1100 км – 1300 км и выше 1800 км. На этих орбитах минимизируется среднегодовая вероятность катастрофических столкновений КО с КМ.

Оценка времени баллистического существования и устойчивости орбит утилизации. Расчёт времени баллистического существования КО, переведённых на орбиты утилизации, и устойчивости орбит утилизации осуществлялся с применением высокоточного численного прогнозирования их движения. Использовался пакет программ DRAMA [6], реализующий полную и точную математическую модель действующих на КО возмущающих сил. В качестве таких сил рассматривались силы, возникающие из-за нецентральности гравитационного поля Земли, и силы аэродинамического сопротивления атмосферы.

Как показал проведённый анализ, влиянием других возмущающих сил при определении времени баллистического существования и эволюции орбит КО, начинающих свое движение на орбитах утилизации, можно пренебречь.

В модели движения КО DRAMA использовался гравитационный потенциал Земли с учётом пяти гармоник его разложения в соответствии с моделью гравитационного поля Земли GEM-T1 [10].

Плотность атмосферы определялась согласно модели атмосферы NRLMSISE-00. Используемые в этой модели индексы солнечной и геомагнитной активности соответствовали данным FOCUS-1A [3].

Прогнозирование движения КО осуществлялось с помощью универсального метода численного интегрирования соответствующих дифференциальных уравнений [6], обладающего высокой вычислительной эффективностью по точности и быстродействию.

В ходе исследований оценивались время баллистического существования и эволюция орбит КО в космосе после перевода их с рабочих орбит с высотами из диапазона 400 км < H_{cp} < 1000 км на орбиты утилизации.

В качестве орбит утилизации рассматривались околокруговые орбиты со средними высотами H_{cp}^{0} ~ 1200 км, ~ 1900 км и наклонениями i_0 = 2°, 72°, 82°, 98° при значениях эксцентриситетов $e_0 = 10^{-6}$ и 10^{-4} .

При расчётах баллистический коэффициент КО σ_x принимал одно из следующих значений: 0,004, 0,006 и 0,01. Кроме того, предполагалось, что начало движения КО по орбитам утилизации приходилось на 01.02.2019 г.

Результаты проведенных расчетов показали, что для всех рассмотренных вариантов прогнозное время существования КО, начинающих свое движение на орбитах утилизации, превышает 100 лет.

Устойчивость орбит КО, начинающих свое движение на орбитах утилизации, также оценивалась в течение 100 лет. Эволюция орбит исследовалась на временном интервале 2019 г. – 2119 г.

В качестве примера на рисунках 4 – 6 приведены результаты прогнозирования эволюции параметров орбиты КО, начинающего своё движение на орбите утилизации со средней высотой ~ 1200 км.

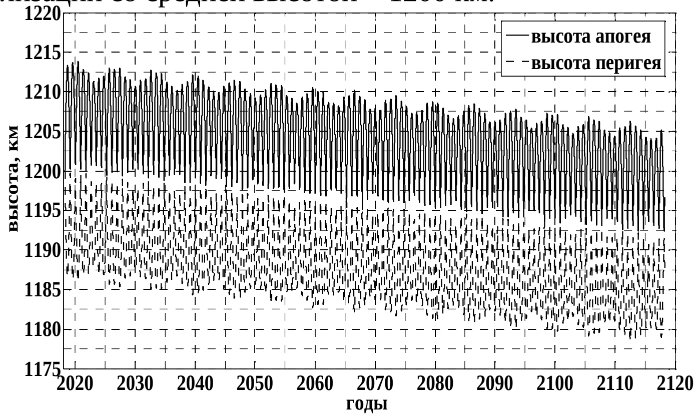

Рис. 4– Изменение высоты апогея и перигея орбиты утилизации по времени (i_0 = 72; $e_0 = 10^{-4}$; σ_x =0,006; начало движения 01.02.2019 г.)

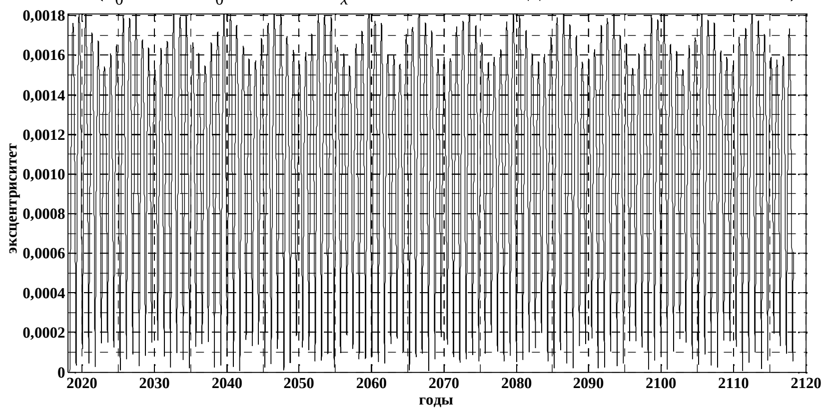

Рис. 5 – Изменение эксцентриситета орбиты утилизации по времени (i_0 = 72; $e_0 = 10^{-4}$; σ_x =0,006; начало движения 01.02.2019 г.)

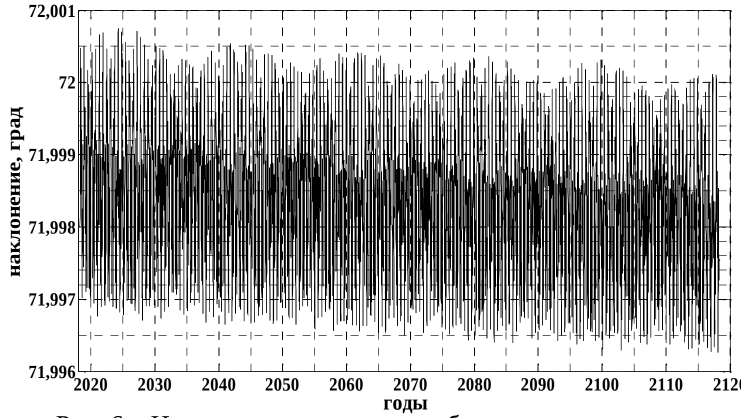

Рис. 6 – Изменение наклонения орбиты утилизации по времени (i_0 = 72; $e_0 = 10^{-4}$; σ_x =0,006; начало движения 01.02.2019 г.)

Представленные на рисунках 4 – 6 графики демонстрируют, что изменения параметров высоты апогея $H_{ап}$, высоты перигея $H_{пер}$, эксцентриситета e и наклонения i рассмотренной орбиты утилизации подчиняются колебательному закону, имеют пренебрежимо малый вековой уход и являются устойчивыми.

В целом, в результате оценки устойчивости орбит КО, начинающих свое движение на рассматриваемых орбитах утилизации, было установлено, что максимальные значения амплитуд колебаний параметров $H_{ап}$ и $H_{пер}$ не превышали 20 км и 15 км соответственно, а изменения эксцентриситета оставались в пределах $e \le 0{,}0019$. Изменения наклонения Δi не превышали 0,01°.

Из результатов проведенных исследований можно сделать вывод, что при удалении КМ из эксплуатируемых областей в предлагаемые зоны утилизации в высотном слое ~ 1100 км – 1300 км и выше 1800 км удаленный КМ будет оставаться в пределах этих зон в течение периода времени, превышающего 100 лет.

Оценка энергетических затрат перевода КО на орбиты утилизации. Оценивались энергетические затраты перевода КО с исходной околокруговой орбиты высотного диапазона 400 км – 1100 км на орбиту утилизации со средней высотой $H_{ср} = 1200$ км и с исходной околокруговой орбиты высотного диапазона 400 км – 800 км на орбиту утилизации со средней высотой $H_{ср} = 1900$ км. Для оценки энергетических затрат межорбитальных переходов использовались характеристическая скорость и относительная масса расходуемого топлива.

Рассматривался трёхимпульсный межорбитальный переход КО на орбиту утилизации. Сначала осуществлялся двухимпульсный компланарный гомановский переход с исходной околокруговой орбиты на околокруговую орбиту со средним радиусом, равным радиусу орбиты утилизации. Затем осуществлялся поворот плоскости полученной орбиты до совмещения с плоскостью орбиты утилизации.

Относительная масса топлива для перевода КО на орбиту утилизации определялась по формуле Циолковского:

$$\frac{m_т}{m_0} = 1 - \exp\left(-\frac{\Delta V}{g\,P_{уд}}\right), \tag{3}$$

где $m_т$ – масса топлива для перевода КО на орбиту утилизации, m_0 – суммарная масса заправленного транспортирующего КА и транспортируемого КО, ΔV – характеристическая скорость орбитального перехода на орбиту утилизации, $P_{уд}$ – удельный импульс тяги двигательной установки КА, g – ускорение свободного падения.

При оценке относительной массы топлива для перевода КО на орбиту утилизации предполагалось, что удельный импульс тяги двигательной установки $P_{уд} = 320$ **с.**

На рис. 7 – 9 представлены зависимости величины характеристической скорости ΔV и относительной массы топлива для перевода удаляемого из рассматриваемой области рабочих орбит КО на орбиты утилизации.

Из графиков на рисунках 7 – 9 видно, что для перевода КО с исходной орбиты на орбиту утилизации могут потребоваться затраты от ~ 0,016 до ~ 0,21 относительной массы топлива.

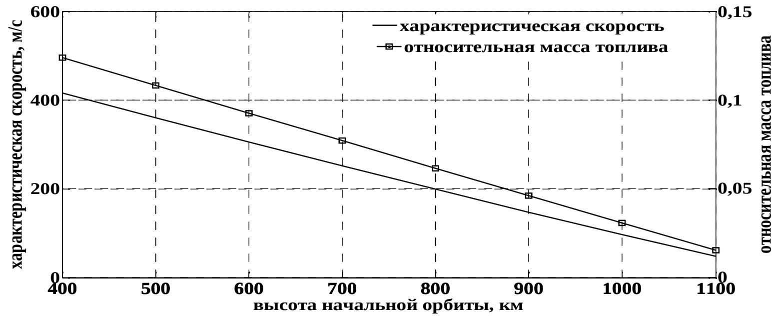

Рис. 7 – Характеристическая скорость и относительная масса топлива компланарного перехода между околокруговыми орбитами высотного диапазона 400 км – 1100 км и орбитой утилизации со средней высотой $H_{ср} = 1200$ *км*

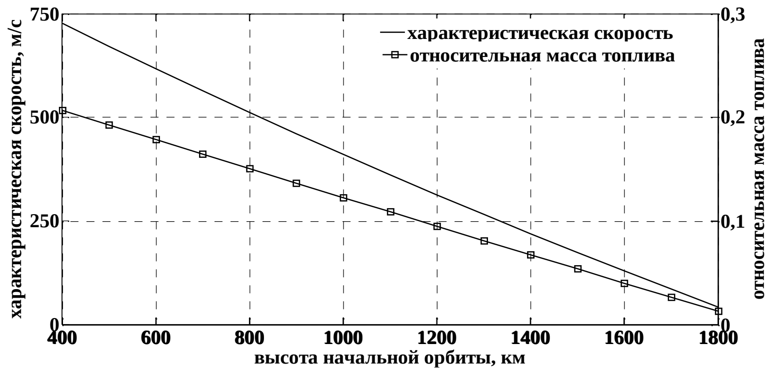

Рис. 8 – Характеристическая скорость и относительная масса топлива компланарного перехода между околокруговыми орбитами высотного диапазона 400 км –1800 км и орбитой утилизации со средней высотой $H_{ср} = 1900$ км

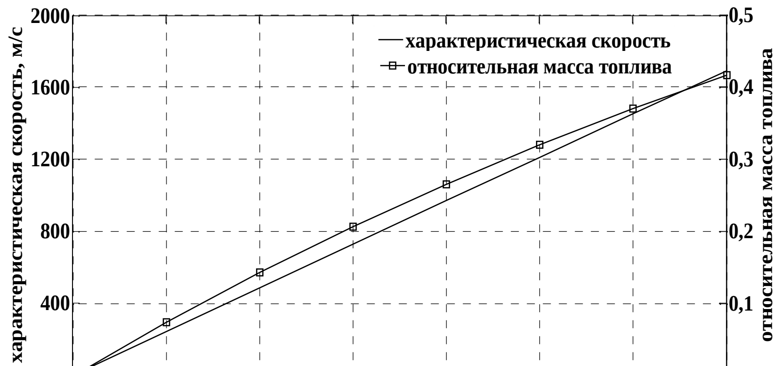

Рис. 9 – Характеристическая скорость и относительная масса топлива поворота плоскости орбиты (высота поворота плоскости орбиты $H_{ср} = 1900$ км)

Из графиков на рисунках 7 – 9 видно, что поворот плоскости орбиты энергетически существенно более затратный, чем изменение средней высоты орбиты. Поэтому разность наклонений орбит утилизируемых КО и орбит утилизации должна выдерживаться в пределах 5°.

Выводы. С точки зрения концепции орбитальной утилизации космического мусора проанализировано современное состояние и методы очистки околоземного космического пространства от техногенного загрязнения. С использованием комплекса программ для математического моделирования космического мусора разработана методика определения и определены области пространственного размещения безопасных орбит утилизации космического мусора в области низких околоземных орбит. Оценены энергетические затраты перевода КО с исходных орбит на орбиты утилизации. В качестве орбит утилизации предложено использовать околокруговые орбиты в высотных слоях в диапазоне 1100 км – 1300 км и выше 1800 км. Наклонения орбит утилизации предложено выбирать в интервалах максимумов концентрации каталогизированных объектов по наклонению (0° – 5°, 70° – 75°, 80° – 85° и 95° – 100°). Полученные результаты могут найти применение при планировании количества и пространственного размещения возможных орбит утилизации космического мусора.

Исследования выполнены за счет финансирования по бюджетной программе “Поддержка развития приоритетных направлений научных исследований” (КПКВК 6541230).

1. Техногенное засорение околоземного космического пространства. Под ред. *А. П. Алпатова.*. Днепропетровск: Пороги, 2012. 378 с.
2. Космический мусор. В 2 кн. Кн. 1: Методы наблюдения и модели космического мусора. Под ред. *Г. Г. Райкунова.* М.:ФИЗМАТЛИТ, 2014. 244 с.
3. *Klinkrad H.* Space Debris Models and Risk Analysis. Berlin: Springer, 2006. 430 p.
4. Flegel S. et al. Maintenance of the ESA MASTER Model: Final Report of ESA. Braunschweig, 2011. 323 p. Contract 21705/D/HK.
6. *Gelhaus J* .et. al. Upgrade of ESA’s Space Debris Mitigation Analysis Tool Suite : DRAMA : Final Report / ESA/ESOC. Braunschweig, 2014. 272 p. Contract № 4000104977/11/D/SR.
7. *Liou J. C.* A Sensitivity Study Of The Effectiveness Of Active Debris Removal In Leo. Houston, 2007. P. 1–7.
8. *Алпатов А. П., Горбулин В. П.* Космические платформы для орбитальных промышленных комплексов: проблемы и перспективы. Вісн. НАН України. 2013.№ 12. С. 26–38.
9. *Алпатов А. П.* Космический мусор: аспекты проблемы. Техническая механика. 2018. № 2. С. 30–47.
10. *Liou J. C.*, *Alford R.* A semi-analytic theory for the motion of a close-Earth artificial satellite with drag. 17th Aerospace Sciences Meeting New Orleans: AIAA paper no. 79–0123.

Получено 11.04.2019,
в окончательном варианте 07.06.2019