

УДК 533.6.011.8:629.78.067

**Т. Г. Смеляя**

Інститут технічної механіки Національної академії наук України  
і Державного космічного агентства України, Дніпропетровськ

## **ОЦЕНКА ПОТОКОВ ТЕХНОГЕННЫХ ЧАСТИЦ НА ПОВЕРХНОСТЬ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА «Січ-2»**

---

*Розглянуто питання, пов'язані із практичним застосуванням аеродинамічної аналогії для розрахунків потоків техногенних часток на навколосезних орбітах. Коротко проаналізовано найвідоміші моделі просторового розподілу космічного сміття навколо Землі. Наведено схему розрахунків потоків сміття на поверхню космічного апарата на базі програмного забезпечення, розробленого раніше для аеродинамічних розрахунків. Представлено результати розрахунків потоків техногенних часток на космічний апарат «Січ-2».*

---

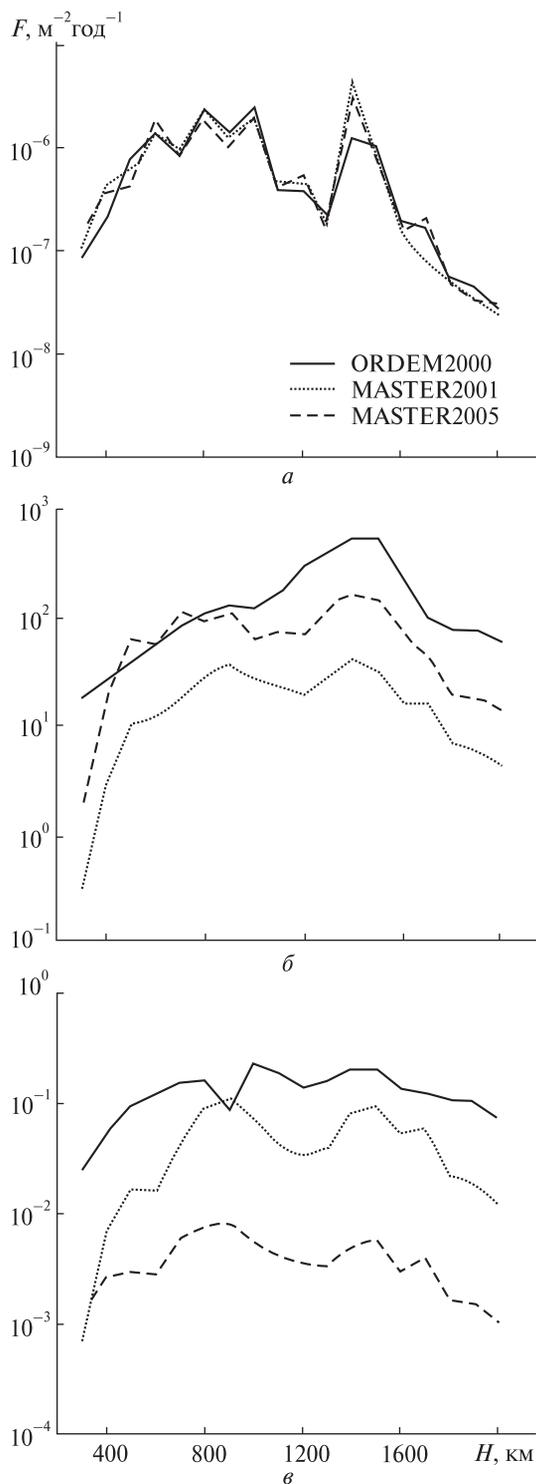
Космический мусор (КМ) (space debris) давно стал одним из важных факторов воздействия на движущийся КА в околоземном космическом пространстве, а иногда и угрозой его активного существования. В связи с этим прогнозирование вероятности сохранения КА своих функциональных возможностей при движении в среде КМ становится все более актуальной задачей. Оценка вероятности столкновения КА с достаточно крупными частицами КМ, способными существенно повредить обшивку КА или элементы его бортовой аппаратуры, на этапе проектирования позволяют разработать необходимые меры защиты и продлить время жизни КА.

Для решения рассматриваемой задачи необходима модель КМ, содержащая сведения о распределении его частиц в пространстве и их физических параметрах. На сегодняшний день существует несколько таких моделей, из которых наиболее популярны модель Европейского космического агентства MASTER [8], модель NASA ORDEM2000 [<http://orbitaldebris.jsc.nasa.gov>], модель SDPA, разработанная в России [7]. На базе модели SDPA-E выпущен ГОСТ-25645.167.2005 «Космическая среда (естественная и искусственная). Модель пространственно-временного распределения плотности потоков тех-

ногенного вещества в космическом пространстве» [4].

Все эти модели дают характеристики потока частиц мусора в зависимости от их размера либо для заданной подспутниковой точки по её высоте и географическим координатам, либо вдоль орбиты КА по её высоте и наклонению. Эти сведения основываются на огромном количестве обобщенных эмпирических данных, полученных при помощи наземных наблюдений в обсерваториях, а также на космических станциях. Границы применения моделей можно оценить по приведенной таблице. Более подробное описание особенностей приведенных моделей распределения потоков частиц КМ приведено в [4, 6–8].

Данные о параметрах КМ, получаемые при помощи разных моделей, часто заметно отличаются [6, 9]. Причиной этого является в первую очередь недостаток, а также неоднородность экспериментальных данных. Кроме этого, возможности наземного слежения за техногенными космическими объектами ограничиваются узкими диапазонами размеров: для низких орбит — не меньше 10–30 см, а для геостационарных орбит (ГСО) — не меньше 75 см. В дополнение к этому измерительная информация может быть получена только на отдельных участках многомерной области «высота и широта точки — размеры КО — время». Поэтому для восполнения



**Рис. 1.** Зависимость величины потока космического мусора от высоты для разных моделей (наклонение орбиты  $i = 100^\circ$ ): *а* — размер частиц более 1 м, *б* — размер частиц более 0.1 мм, *в* — размер частиц более 1 мм

недостающих данных привлекается дополнительная (априорная) информация.

Наилучшее совпадение моделей наблюдается для частиц с размерами более 1 м (рис. 1, *а*). Наибольшее отличие имеет место для объектов размером от 100 нм до 1 см (рис. 1, *б, в*), а данные о величине потока мусора для таких частиц в зависимости от скорости столкновения на некоторых орбитах могут отличаться в десятки раз [9]. Например, натурные эксперименты показали, что солнечные панели пробиваются частицами размером 1–1.5 мм, движущимися со скоростью 5–7 км/с; а корпус КА — частицами размером 1 мм и скоростью 5 км/с [11]. Это значит, что наибольший интерес для расчетов и оценки «пробоя — не пробоя», представляет именно тот диапазон размеров КМ, который, к сожалению, имеет наименьшую достоверность данных. Но, несмотря на все недостатки моделей, они все же позволяют оценивать воздействие на КА потоков частиц КМ, а значит и время жизни спутника, деградацию его частей, а также бортовой аппаратуры.

Физическая аналогия между движением в облаке КМ и процессами торможения КА в верхней атмосфере Земли [7] позволяет применить методы и алгоритмы, отработанные для молекулярного переноса вещества, к задаче воздействия потоков КМ на КА. При этом пространственное распределение частиц верхней атмосферы Земли заменяется на аналогичные параметры модели КМ. Модель рассматривает мусор как сумму нескольких сред, состоящих из частиц определенного поперечного размера, попадающих в один из заданных диапазонов. Задача решается для каждого такого диапазона независимо друг от друга.

В настоящей работе для получения количественных характеристик потока КМ вдоль траектории полета КА использован демонстрационный вариант модели пространственно-временного распределения техногенного вещества ORDEM2000. Идея методики расчета потоков КМ на выпуклые тела простой геометрической формы, а также вероятностных характеристик позаимствована из работы А. И. Назаренко [7].

Расчетные алгоритмы и программы строятся на основе алгоритмического и программного обес-

печения, разработанного в Институте технической механики Национальной академии наук Украины и Государственного космического агентства Украины для решения задач аэродинамики разреженных газов [3]. Главным их достоинством является применимость к расчету потоков на КА сложной формы с учетом взаимного затенения отдельных элементов конструкции.

Вместо скорости набегающего потока верхней атмосферы вводится понятие относительной скорости  $V_{rel}$  встречи КА с фрагментами КМ (рис. 2). Здесь  $\alpha$  — азимутальный угол сближения частицы космического мусора с аппаратом в относительном движении;  $S$  — точка пересечения орбит КА и КМ;  $\theta$  — угол пересечения орбит КА и КМ;  $V_{КА}$  — скорость КА;  $V_{ч}$  — скорость отдельной частицы КМ. Аналогичная задача была успешно решена при аэрогазодинамическом сопровождении международного проекта «Венера-Галлей», когда необходимо было решать задачу высокоскоростного взаимодействия (~80 км/с) пылевой составляющей кометной атмосферы с элементами конструкции КА «Вега» [10].

Частицы КМ фактически являются спутниками Земли. Малость радиальной составляющей вектора их скорости в геоцентрической системе координат (<0.1 км/с) по сравнению с горизонтальной составляющей (от 6 до 11 км/с) дает нам право пренебречь ею.

В отличие от задачи свободномолекулярного обтекания КА одномерным потоком газа, «набегающий» поток КМ двумерный. Вследствие этого при расчете силового воздействия частиц КМ на поверхность КА следует учитывать все возможные направления подлета техногенных

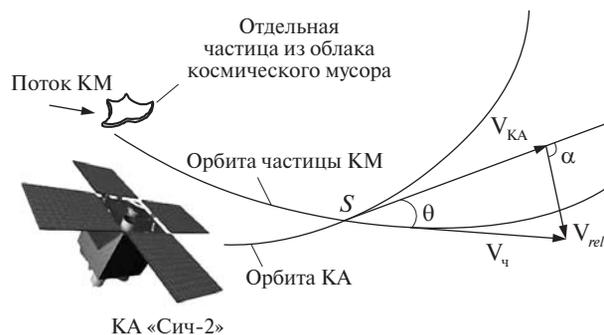


Рис. 2. Схема взаимного движения КА и отдельной частицы КМ

частиц. Для этого так называемая горизонтальная плоскость, в которой движутся частицы КМ, разбивается на равные сектора с центром, совпадающим с центром КА, и задача решается для каждого сектора отдельно. Внутри сектора вычисляется величина относительной скорости сближения частиц КМ и КА. Её направление определяется азимутальным углом  $\alpha$ .

Внешняя поверхность КА разбивается на базовые элементы, каждый из которых, в свою очередь, разбивается на элементарные площадки  $dS$ . Проверяется экранирование элементарной площадки элементами конструкции КА в направлении относительной скорости сближения внутри сектора. Введем угол  $\beta$  между внешней нормалью к элементарной площадке и направлением относительной скорости набегающего потока  $V_{rel}$ . В случае отсутствия экранирования вычисляется  $\cos\beta$ . Суммированию подлежат только те элементарные площадки, для которых  $\cos\beta > 0$ . Для каждой элементарной площадки

#### Границы применимости разных моделей распределения частиц в пространстве

Модели	Размеры частиц, нм	Высота орбиты, км	Период времени, год	Формы орбит	Природа учтенных объектов
ORDEM2000	>10	200—2000	1991—2030	Круговые и эллиптические	Техногенные
MASTER (версия 2001)	>1	186—38786	1958—2050	Круговые	Техногенные и метеороиды
MASTER (версия 2005)	>1	186—36786	1957—2055	Круговые	Техногенные и метеороиды
SDPA	>1000	200—2000, 35700±400	2000—2025	Круговые и эллиптические	Техногенные

выполняются расчеты с использованием требуемых физических параметров. Суммируя полученные значения искомых характеристик для всех площадок, получим полный поток частиц КМ на поверхность КА внутри  $i$ -го сектора:

$$\begin{aligned} \frac{dN_{d\alpha}}{dt} &= dQ(d\alpha) = \\ &= \rho(t) \int_S d\alpha \cdot p(t, \alpha) \cdot V_{rel}(\alpha) \cos\beta(\alpha, S) dS = \\ &= \rho(t) d\alpha p(t, \alpha) V_{rel}(\alpha) S(\alpha), \end{aligned}$$

где  $S(\alpha) = \int_S \cos\beta(\alpha, S) dS$ ,  $N$  — число частиц КМ в потоке;  $\rho(t)$  — объемная плотность частиц,  $1/\text{км}^3$ ;  $p(t, \alpha)$  — плотность распределения направлений потока частиц в данной точке пространства, %;  $t$  — временной параметр, с;  $dS$  — площадь элементарной площадки,  $\text{м}^2$ ;  $dQ(d\alpha)$  — поток частиц на поверхность КА для азимутального сектора  $d\alpha$ ,  $S(\alpha)$  — эффективная площадь КА в направлении потока КМ.

Полный поток КМ через всю его поверхность КА можно получить, суммируя поток по всем направлениям подлета частиц КМ к аппарату:

$$\begin{aligned} \frac{dN}{dt} &= Q = \int_{\alpha} dQ(d\alpha) = \\ &= \rho(t) \int_{\alpha} \int_S \cos\beta(\alpha) p(t, \alpha) V_{rel}(\alpha) d\alpha dS. \end{aligned} \quad (1)$$

Согласно [4, 5] суммарный поток частиц КМ на поверхность КА, как и силу лобового сопротивления в аэродинамике, можно представить в виде

$$\frac{dN}{dt} = Q = C_N S_{\text{хар}} \rho(t) \bar{V}_{rel}(t, \alpha) d\alpha, \quad (2)$$

где  $S_{\text{хар}}$  — значение характерной площади,  $\text{м}^2$ ;  $\bar{V}_{rel}$  — средняя относительная скорость столкновения КМ с космическим аппаратом,  $\text{км/с}$ ;  $C_N$  — некий коэффициент формы, который определяется геометрией и ориентацией КА в потоке частиц КМ и в некотором смысле является аналогом коэффициента лобового сопротивления.

Значение средней относительной скорости столкновения, являющейся аналогом средней относительной скорости движения КА в воздухе в аэродинамике, определяется по формуле

$$\bar{V}_{rel}(t) = \int_{\alpha} p(t, \alpha) V_{rel}(\alpha) d\alpha, \quad (3)$$

а коэффициент  $C_N$ , в соответствии с (1)—(3), представим в виде

$$\begin{aligned} C_N &= \frac{Q}{S_{\text{хар}} \rho \bar{V}_{rel}} = \\ &= \frac{\int_{\alpha} \int_S \cos\beta(\alpha) p(t, \alpha) V_{rel}(\alpha) d\alpha dS}{S_{\text{хар}} \int_{\alpha} p(t, \alpha) V_{rel}(\alpha) d\alpha}. \end{aligned}$$

Среднее значение числа столкновений частиц КМ с поверхностью КА определяется из соотношения

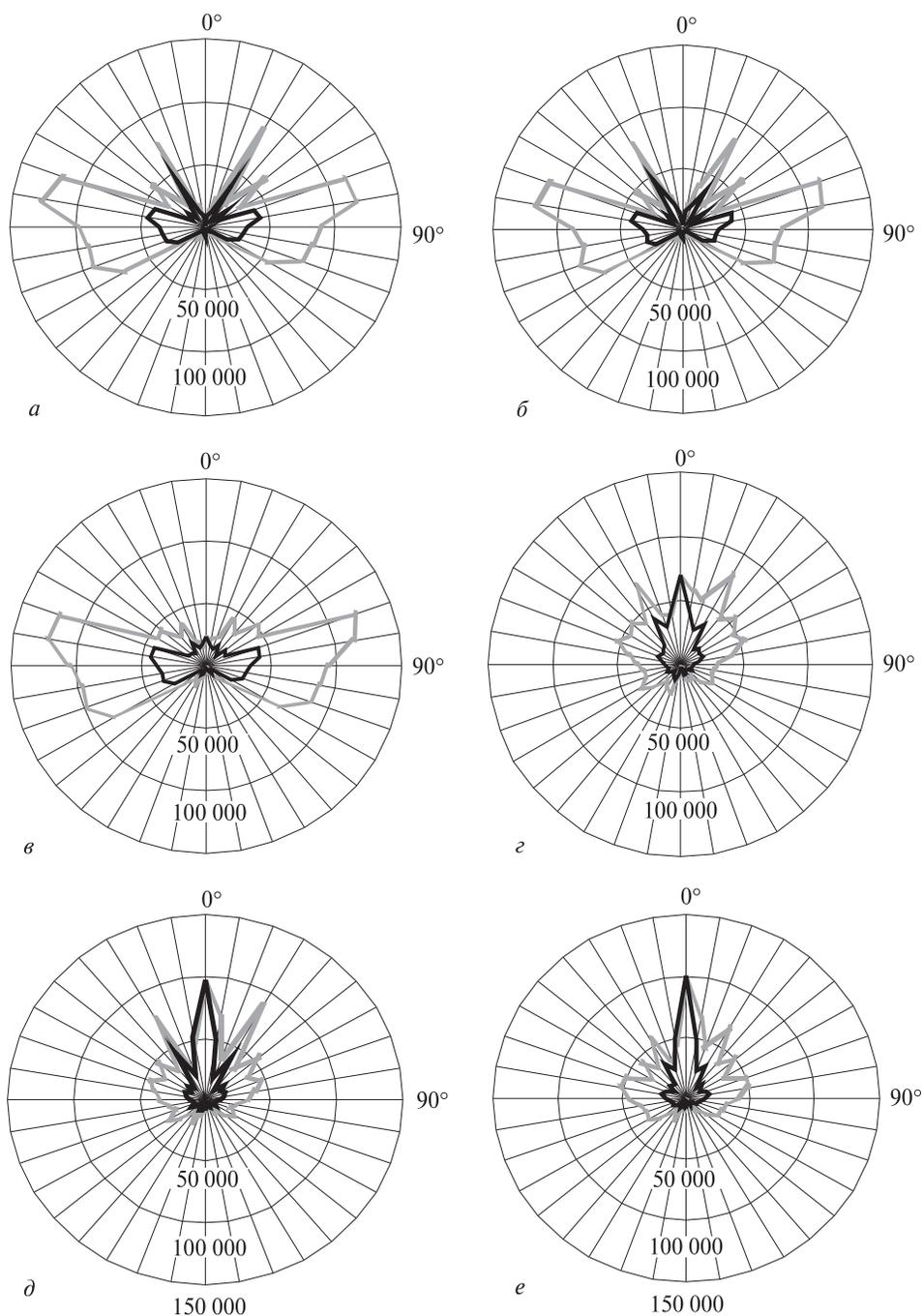
$$N = C_N S_{\text{хар}} \bar{\rho} \bar{V}_{rel} t,$$

где  $\bar{\rho}$  — усреднённое по траектории значение объемной плотности.

Коэффициент формы  $C_N$  — безразмерная величина. В частном случае для КА сферической формы (характерная площадь  $S = \pi R^2$ ) значение  $C_N$  равно 1.

В работе [1] приведены результаты расчетов  $C_N$  для тел простой формы в зависимости от размера техногенных частиц, высоты орбиты и её наклона, проведенные для разработанного расчетного алгоритма на основании данных модели ORDDEM2000. Они показали хорошее соответствие результатам [7]. Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод, что из всех определяющих параметров задачи наиболее существенным является распределение направлений потока частиц мусора, подлетающих к КА. Это распределение имеет сложный характер и зависит как от географической широты и долготы, так и от высоты над уровнем Земли. В работе [4] приведены таблицы и графики, иллюстрирующие распределение направлений потока в зависимости от параметров орбиты (высоты и наклона). В работе [1] представлено также семейство кривых значений  $C_N$  в зависимости от диаметра частиц мусора для КА сложной геометрической формы.

В настоящей работе внимание сосредоточено на расчетах потоков КМ на КА системы «Січ-2» (МС-2-8, «Мікросат»), движущиеся по солнечно-синхронным орбитам (наклонение орбиты  $i = 98^\circ$ ) высотой  $H = 700$  км. Рассматриваемый аппарат состоит из корпуса и четырех солнечных батарей (рис. 2), а его внешняя поверхность аппроксимируется 30 базовыми элементами [2].



**Рис. 3.** Суммарные потоки КМ на поверхность «Січ-2» за один орбитальный период (серая линия — максимальный поток, черная — минимальный поток): *a* — частицы размером более 10 нм, *б* — частицы размером более 100 нм, *в* — частицы размером более 1 мм, *г* — частицы размером более 1 см, *д* — частицы размером более 10 см, *е* — частицы размером более 1 м

На рис. 3 приведены круговые диаграммы суммарных значений потока КМ на этот КА вдоль одного витка на орбите для шести диапазонов размеров частиц. Расчеты сделаны для случая минимальной и максимальной эффективной площади КА. В первом случае КА ориентирован таким образом, что горизонтальная плоскость, в которой движется поток КМ, параллельна плоскости солнечных батарей, и частицы попадают фактически только на боковые стороны корпуса. Во втором случае направление движения КА перпендикулярно к рабочей плоскости батарей, и техногенные частицы, имеющие самую большую величину относительной скорости, попадают на солнечные батареи под прямым углом. Видно, что потоки КМ для разных диапазонов частиц падают на его поверхность практически симметрично относительно оси движения, но характер их распределения по азимутальному углу  $\alpha$  различен. Для частиц не более 1 мм максимальные потоки падают под углом  $90 \pm 20^\circ$ , имея пики около  $30^\circ$ ; для остальных размеров частиц основной пик появляется при  $\alpha = 0 \pm 30^\circ$  и постепенно увеличивается для случая с не работающими солнечными батареями (черная линия), а для максимального потока (серая линия) пики появляются только для частиц размером более 10 см. Графики позволяют определить наиболее вероятные направления движения потоков техногенных частиц заданных размеров и скоростей.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ результатов расчетов потоков КМ на поверхность КА позволили установить:

- решающее влияние на результаты данных о круговом распределении техногенного мусора в горизонтальной плоскости;
- существенное влияние ориентации КА на величины потоков и характер их распределения.

Полученное программное обеспечение может использоваться для определения наиболее выгодной ориентации КА (с точки зрения попадания на его поверхность минимальных потоков КМ), а также определения наиболее безопасных зон расположения уязвимых элементов КА.

1. *Абрамовская М. Г., Басс В. П., Данакин Ю. В., Смеляя Т. Г.* Применение методов динамики разреженного газа для определения потоков техногенных час-

тиц в верхней атмосфере Земли на поверхность космических аппаратов // *Техническая механика*. — 2010. — № 4. — С. 44—56.

2. *Абрамовская М. Г., Басс В. П., Перминов В. Д.* Пакет прикладных программ «Высота-2». Описание применения. — М.: ОФАП МАП, 1990. — 175 с.
3. *Басс В. П.* Молекулярная газовая динамика и ее приложения в ракетно-космической технике. — Киев: Наук. думка, 2008. — 272 с.
4. *ГОСТ Р 25645.167—2005.* Космическая среда (естественная и искусственная). Модель пространственно-временного распределения плотности потоков техногенного вещества в космическом пространстве. — М.: Стандартинформ, 2005. — 41 с.
5. *Иванов В. Л., Меньшиков В. А., Пчелинцев Л. А., Лебедев В. В.* Космический мусор. Проблема и пути её решения. — М.: Патриот, 1996. — Т. 1. — 360 с.
6. *Модель космоса: В 2 т.* — М.: КДУ, 2007. — Т. 2: Воздействие космической среды на материалы и оборудование космических аппаратов / Под ред. М. И. Панасюка, Л. С. Новикова. — 1144 с.
7. *Назаренко А. И.* Аэродинамическая аналогия взаимодействия поверхности КА разной формы с космическим мусором // *Космич. исслед.* — 1996. — **34**, № 3. — С. 317—324.
8. *Bendisch J., Bunte K., Klinkrad H., et al.* The MASTER-2001 model // *Adv. Space Res.* — 2004. — **34**, N 5. — P. 959—968.
9. *Fukushige Sh., Akahoshi Y., Kitazawa Y., et al.* Comparison of Debris Environment Models; ORDEM2000, MASTER2001 and MASTER2005 // *IHI Engineering Review*. — 2007. — **40**, N 1. — P 31—41.
10. *Rijov Yu. A., Bass V. P., Kovtunenkov V. M.* Aerodynamic problems of space probes in comet atmosphere // *Rarefied Gas Dynamic: 13 International Symposium on Rarefied Gas Dynamic*. — New York, London: Plenum Press, 1982. — Vol. 1. — P. 503—511.
11. *Schaefer F. K., Schneider E., Lambert M.* Review of ballistic limit equations for composite structure walls of satellites // *Proc. of the 5th Internat. Symp. on Environmental Testing for Space Programmes* / Ed. by K. Fletcher. — Noordwijk, The Netherlands, 2004. — P. 431—444. — (ESA SP-558, June 2004).

*Надійшла до редакції 01.10.11*

*T. G. Smelaya*

### AN ESTIMATION OF ANTHROPOGENIC PARTICLE FLUXES ON THE SICH-2 SPACE VEHICLE SURFACE

We consider some questions related to the practical application of aerodynamic analogy to the calculations of anthropogenic particle fluxes in near-Earth orbits. Well-known models for spatio-temporal distribution of space debris around the Earth are briefly analyzed. A calculation scheme for space debris fluxes on the surface of a space vehicle with the use of the existing software for aerodynamic calculations is given. Our results of calculations for anthropogenic particle fluxes on the surface of the Sich-2 system space vehicle are presented.