



Столыпинский  
вестник

Научная статья

Original article

УДК 533.69

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТЕЙ ПРОЕКТИРОВАНИЯ  
КОЛЛЕКТОРА КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА**

**STUDY OF THE DEPENDENCES OF THE DESIGN OF THE COLLECTOR OF  
THE SPACE VEHICLE**

**Мустафин Ильяс Ильдарович**, студент, МГТУ им.Н.Э.Баумана (105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1), тел. 8 (499) 263-6391, <https://orcid.org/0000-0003-3980-9678>, [ilyas.827@mail.ru](mailto:ilyas.827@mail.ru)

**Богачева Анна Александровна**, студент, МГТУ им.Н.Э.Баумана (105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1), тел. 8 (499) 263-6391, <https://orcid.org/0000-0002-4699-6750>, [Potehina\\_anna01@mail.ru](mailto:Potehina_anna01@mail.ru)

**Ilyas M. Ildarovich**, student, BMSTU (105005, Moscow, ul. Baumanskaya 2-ya, 5/1, Russia), tel. 8 (499) 263-6391, <https://orcid.org/0000-0003-3980-9678>, [ilyas.827@mail.ru](mailto:ilyas.827@mail.ru)

**Anna B. Alexandrovna**, student, BMSTU (105005, Moscow, ul. Baumanskaya 2-ya, 5/1, Russia), tel. 8 (499) 263-6391, <https://orcid.org/0000-0002-4699-6750>, [Potehina\\_anna01@mail.ru](mailto:Potehina_anna01@mail.ru)

**Аннотация.** В статье исследованы некоторые зависимости проектирования коллектора космического аппарата: влияние концентрации моделируемых частиц

на точность моделирования работы установки, механизм рассеивания частиц на задней стенке коллектора, величина максимально допустимой степени сжатия в коллекторе и его оптимальная геометрия.

**Abstract.** In the article some dependences of the design of the spacecraft collector are studied: the influence of the concentration of simulated particles on the accuracy of the simulation of the operation of the installation, the mechanism of particle dispersion on the back wall of the collector, the value of the maximum allowable compression ratio in the collector and its optimal geometry.

**Ключевые слова:** космический аппарат, коллектор, рассеивание частиц, воздухозаборник, термализация частиц.

**Keywords:** spacecraft, collector, particle dispersion, air intake, particle thermalization.

В продолжение исследования двигательной установки, работающей на забортном воздухе [1], в настоящей статье будут исследованы некоторые параметры проектирования коллектора, применяемого в космических аппаратах для термализации частиц, а также уменьшения их обратного потока. Принцип работы такого коллектора, форма воздухозаборника и сеточная структура его канала обозначены в исследовании [2] (рисунок 1).

В процессе моделирования, в начальный момент времени весь объем исследуемого коллектора содержит 1000 случайно расположенных частиц, предполагается, что они двигаются сонаправленно оси воздухозаборника со скоростью 7,8 км/с.

В этот же момент времени перед исследуемым объектом появляется “цилиндр”, содержащий установленное автором эксперимента число частиц. Все появившиеся частицы с заданной скоростью движутся из цилиндра в воздухозаборник. Цилиндр пополняется частицами в момент, когда последняя из них покидает его пределы. Это позволяет моделировать непрерывный поток частиц.

В данной модели частицы не взаимодействуют друг с другом, поскольку длина их свободного пробега лежит в интервале от 1 м до 380 м, что значительно больше характерных размеров воздухозаборника [3-5]. Это означает, что они в основном взаимодействуют со стенками воздухозаборника [6-7].

### **1. Исследование влияния концентрации частиц на точность моделирования**

Для оценки влияния концентрации набегающих частиц на результаты моделирования, был произведён расчёт с таким числом элементов как: 500, 750, 1000, 2000, 5000, 10000. Оцениваемым параметром является число элементов, попадающих в отверстие на задней стороне коллектора в единицу времени. Это отверстие играет роль двигателя. На рисунке 2 представлен график зависимости числа частиц во времени при их разной концентрации.

Начальный всплеск обусловлен наличием начальных частиц в воздухозаборнике. Согласно полученному графику, поток выходит на “полку” примерно за 1 мкс.

Проанализировав полученный результат, можно увидеть, что поток растёт линейно с увеличением числа частиц. Это позволяет сделать вывод о том, что в отсутствие сетки увеличение или уменьшение числа частиц не вызывает дополнительных эффектов. Значит, объем воздухозаборника и бессеточный воздухозаборник в целом можно моделировать, используя меньшее число частиц и экстраполировать результат на большее число без потери точности эксперимента.

### **2. Исследование механизма рассеивания частиц на стенке коллектора**

В общем случае, все уравнения вакуумной техники получены с условием диффузного столкновения частиц со стенкой. Справедливость данного условия была подтверждено многочисленными экспериментами в случае термализованного потока [8,9].

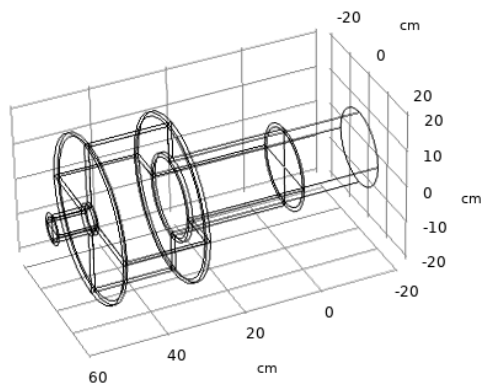


Рисунок 1. Вид расчётной модели

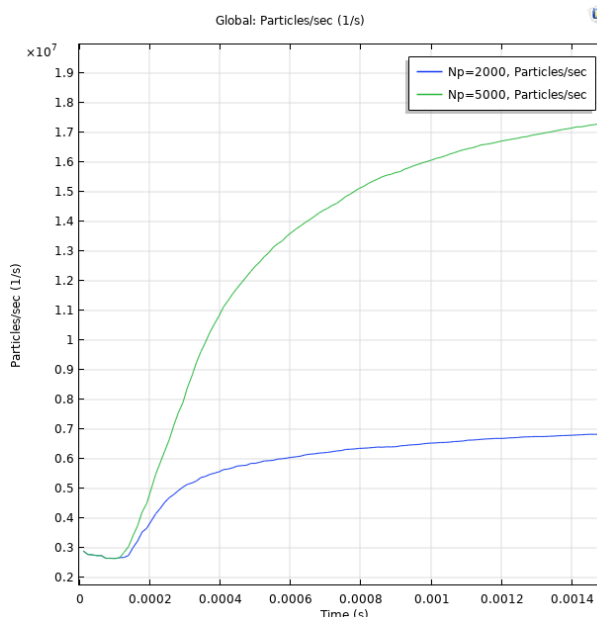


Рисунок 2. Поток частиц в двигатель при различном числе набегающих частиц

В нашем случае поток термализуется только в коллекторе. Значительное число частиц из-за большой скорости может также зеркально (или близко к зеркальному) отражаться от стенки воздухозаборника, от стенок сетки. Величину этого эффекта в том числе определяет шероховатость поверхности, чем она более гладкая, тем больше частиц отражается зеркально.

Поскольку влияние этого эффекта затруднительно оценить аналитически, был проведён численный эксперимент. В этом эксперименте оценивалось влияние доли диффузно рассеянных частиц от зеркально отраженных. Это отношение принималось равным 0 (диффузное рассеяние), 0.1, 0.5, 0.9, 1 (зеркальное отражение).

На рисунке 3 видно изменение потока частиц при разных значениях коэффициента. Видно, что в интервале 0.5 - 1 его влияние незначительно, однако в интервале с 0 до 0.5 присутствует резкий скачок.

Из этого можно сделать вывод о том, что эффект зеркального отражения частиц незначительно влияет на поток даже при значительном количестве зеркально отраженных частиц.

### 3. Определение максимально допустимой степени сжатия в коллекторе и его оптимальной геометрии

Важной задачей, решаемой численным экспериментом, является поиск максимальной степени сжатия в коллекторе. При максимальной степени сжатия поток частиц в двигатель также будет максимальным, поскольку другие параметры входного канала не изменяются [10].

В разработанной модели исследовался случай с постоянной длиной коллектора и переменным диаметром. Исследовались радиусы: 11 см, 15 см, 20 см, 40 см, 70 см, 100 см.

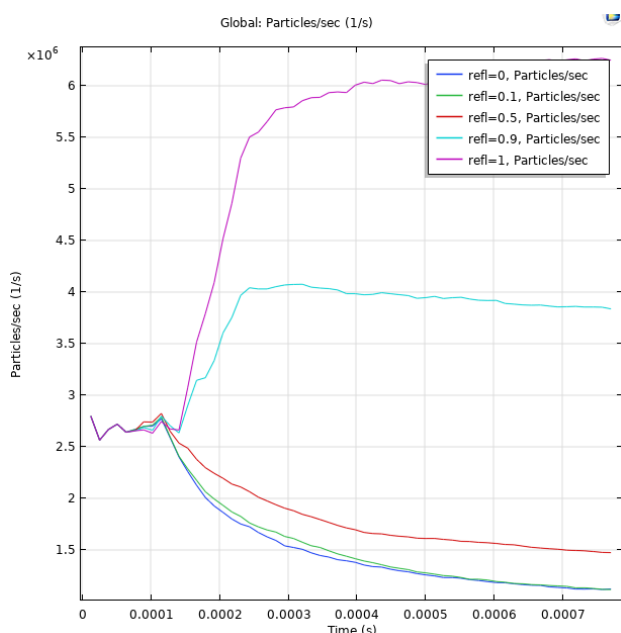


Рисунок 3. Поток частиц в двигатель при различном значении коэффициента отражения

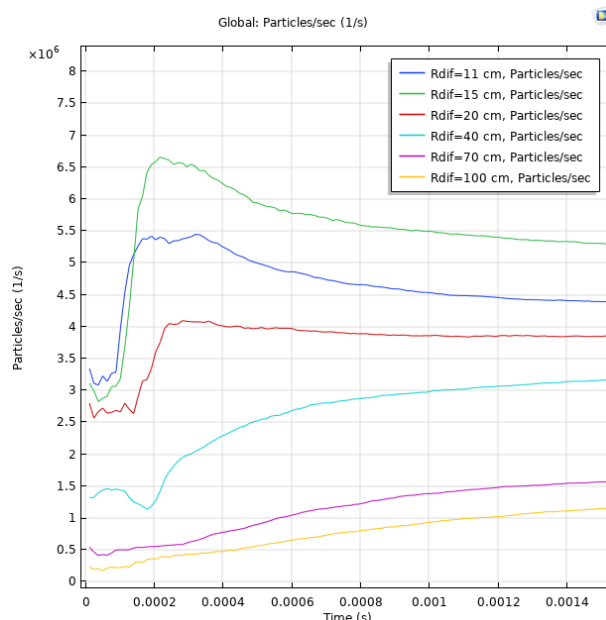


Рисунок 4. Поток частиц в двигатель при различном диаметре коллектора

Из рисунка 4 видно, что существует оптимальное отношение диаметра коллектора к диаметру воздухозаборника составило 1,2.

#### Выводы:

Результаты экспериментов с одной стороны отвечают на некоторые сложные вопросы проектирования коллекторов космических аппаратов, а с другой

позволяют авторам в будущем проводить более углубленные исследования в данной области.

### Литература

1. А. А. Богачева, И. И. Мустафин, Исследование воздухозаборника двигательной установки, работающей на заборном воздухе // Санкт-Петербург: Частное научно-образовательное учреждение дополнительного профессионального образования Гуманитарный национальный исследовательский институт «НАЦРАЗВИТИЕ», 2022. – С. 21-23.
2. Белов Д.Д., Дюдина В.В., Сапрыкин В.В., Задорожный В.В., Норов П.М., Расчет оптимального диаметра воздухозаборника двигательной энергетической установки для малых космических аппаратов // НиКСС. 2022. №3 (39).
3. Barbashov N. N., L. R. Abdullina Selection of effective criteria for determining the volume of measurements // JOP Conference Series: Metrological Support of Innovative Technologies, Krasnoyarsk – Russia: Institute of Physics and IOP Publishing Limited, 2020. – P. 52029. – DOI 10.1088/1742-6596/1515/5/052029.
4. Longmier B W et al 2011 VX-200 magnetoplasma thruster performance results exceeding fifty-percent thruster efficiency. J. Propul. Power 27(4) 915–920
5. Takahashi K et al 2010 Characterization of the temperature of free electrons diffusing from a magnetically expanding current-free double layer plasma. Journal of Physics D: Applied Physics 43(16) 162001-1–4
6. Орехов В. Д. Исследование движения частиц в канале воздухозаборника // Ученые записки ЦАГИ. 1980. №2.
7. Даниленко Николай Владимирович, Пахомов Сергей Васильевич, Сафарбаков Андрей Мирсасимович Математическое моделирование интерференционных вихрей воздухозаборников // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2015. №1 (45).
8. K. Takahashi, C. Charles, R. Boswell, M.A. Lieberman, R. Hatakeyama, Characterization of the temperature of free electrons diffusing from a magnetically

- expanding current-free double layer plasma. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 43(16), 162001-1–4 (2010).
9. B.W. Longmier, L.D. Cassady, M.G. Ballenger, M.D. Carter, F.R. Chang-Diaz, T.W. Glover, A.V. Ilin, G.E. McCaskill, C.S. Olsen, J.P. Squire, VX-200 magnetoplasma thruster performance results exceeding fifty-percent thruster efficiency. *J. Propul. Power* 27(4), 915–920 (2011).
  10. Leila Abdullina, Vladislav Smirnov, Anna Alimova, Alina Kalistratova and Alexander Kravets, Development of eco-friendly mechanized rotary parking lots with a flywheel energy storage device // *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 677 052037, 2021.

### References

1. A. Bogacheva, I. I. Mustafin, Study of the air intake of a propulsion system operating on outboard air // St. Petersburg: Private scientific and educational institution of additional professional education Humanitarian National Research Institute "NATSRZVITIYE", 2022. - P. 21-23.
2. D. D. Belov, V. V. Dyudina, V. V. Saprykin, V. V. Zadorozhny, and P. M. Norov, "Calculation of the optimal diameter of the air intake of a propulsion and power plant for small spacecraft," *Nikss.* 2022. No. 3 (39).
3. Barbashov N. N., L. R. Abdullina Selection of effective criteria for determining the volume of measurements // *JOP Conference Series: Metrological Support of Innovative Technologies*, Krasnoyarsk – Russia: Institute of Physics and IOP Publishing Limited, 2020. – P. 52029. – DOI 10.1088/1742-6596/1515/5/052029.
4. Longmier B W et al 2011 VX-200 magnetoplasma thruster performance results exceeding fifty-percent thruster efficiency. *J. Propul. Power* 27(4) 915–920
5. Takahashi K et al 2010 Characterization of the temperature of free electrons diffusing from a magnetically expanding current-free double layer plasma. *Journal of Physics D: Applied Physics* 43(16) 162001-1–4
6. Orekhov VD Investigation of the movement of particles in the air intake channel // *Uchenye zapiski TsAGI.* 1980, №2.

7. Danilenko Nikolay Vladimirovich, Pakhomov Sergey Vasilievich, Safarbakov Andrey Mirsasimovich Mathematical modeling of interference vortices of air intakes // Modern technologies. System analysis. Modeling. 2015, №1. (45).
8. K. Takahashi, C. Charles, R. Boswell, M.A. Lieberman, R. Hatakeyama, Characterization of the temperature of free electrons diffusing from a magnetically expanding current-free double layer plasma. J. Phys. D: Appl. Phys. 43(16), 162001-1–4 (2010).
9. B.W. Longmier, L.D. Cassady, M.G. Ballenger, M.D. Carter, F.R. Chang-Diaz, T.W. Glover, A.V. Ilin, G.E. McCaskill, C.S. Olsen, J.P. Squire, VX-200 magnetoplasma thruster performance results exceeding fifty-percent thruster efficiency. J. Propul. Power 27(4), 915–920 (2011).
10. Leila Abdullina, Vladislav Smirnov, Anna Alimova, Alina Kalistratova and Alexander Kravets, Development of eco-friendly mechanized rotary parking lots with a flywheel energy storage device // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 677 052037, 2021.

© Мустафин И.И., Богачева А.А., 2022 Научный сетевой журнал «Столыпинский вестник» №8/2022.

**Для цитирования:** Мустафин И.И., Богачева А.А. Исследование зависимостей проектирования коллектора космического аппарата // Научный сетевой журнал «Столыпинский вестник» №8/2022.