

УДК 629.78:621.368

## **Абляционный импульсный плазменный двигатель с разделённым механизмом ионизации и ускорения рабочего тела**

Богатый А. В., Дьяконов Г. А., Нечаев И. Л.

### **Аннотация**

Статья посвящена перспективному направлению развития абляционных импульсных плазменных двигателей (АИПД) – двигатели с двухступенчатой системой ускорения рабочего тела. Рассмотрены принцип действия АИПД, различные типы двигателей, их достоинства и недостатки. Рассмотрены возможности повышения характеристик и сопутствующие этому проблемы.

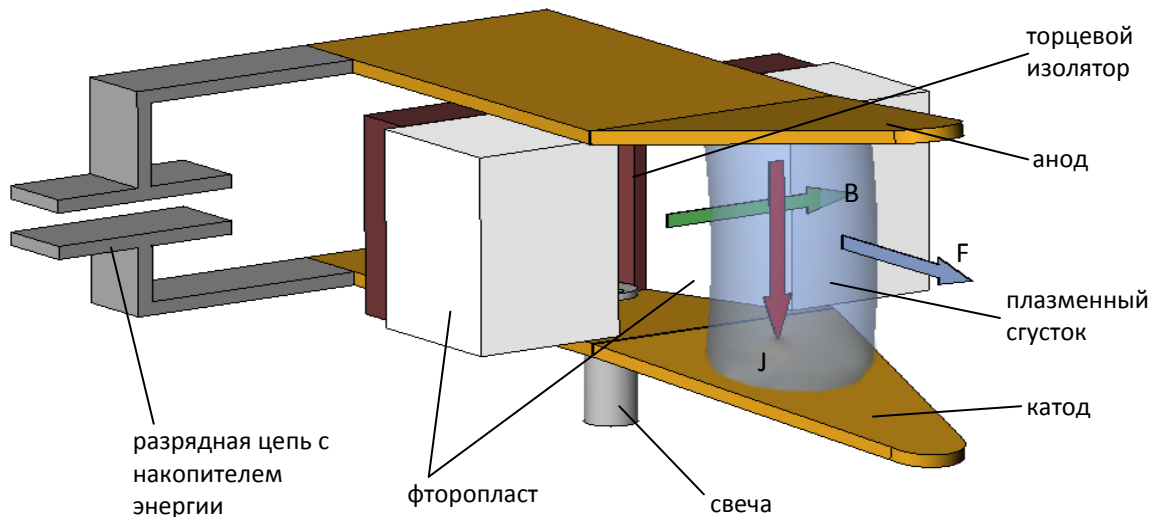
### **Ключевые слова**

электроракетный двигатель; абляционный импульсный плазменный двигатель; ускоритель плазмы; источник плазмы; малый космический аппарат

Освоение космического пространства с каждым годом становится всё более востребовано для обеспечения различных потребностей человечества. В связи с этим возникает необходимость в новых космических аппаратах (КА), оснащённых современными и высокоэффективными двигательными установками. Для малых КА (до 300 кг) наиболее целесообразно применение корректирующей двигательной установки на базе абляционного импульсного плазменного двигателя (АИПД). По сравнению с электроракетными двигателями других типов он обладает рядом неоспоримых преимуществ: меньшей массой, простотой конструкции, высокой отказоустойчивостью, высокими ресурсом и надёжностью, и при этом меньшей себестоимостью.

Рассмотрим принцип работы АИПД на примере ускорителя рельсовой геометрии с боковой подачей рабочего тела (Рисунок 1): ускорительный (разрядный) канал образован двумя электродами, соединёнными с обкладками конденсатора и торцевыми поверхностями шашек рабочего тела (тефлона), шашки рабочего тела подаются в разрядный канал через его боковые поверхности навстречу друг другу. Разряд и импульсное ускорение плазмы в АИПД происходят следующим образом. От источника электроэнергии заряжается накопитель

энергии, электрически связанный с электродами двигателя. Инициатором срабатывания двигателя является высоковольтный искровой разряд в свече. В результате в разрядном канале появляется некоторое количество заряженных частиц, после чего происходит пробой между электродами разрядного канала. Начинается импульсный разряд конденсаторной батареи продолжительностью от 3 до 15 мкс. Вначале на торцевых поверхностях шашек рабочего тела, а затем во всем объеме разрядного канала начинает развиваться токовый «жгут» искровой стадии разряда. Под действием теплового потока и излучения разряда шашки аблируют, а пары фторопласта диссоциируют, ионизируются и поступают в разряд. Разрядный ток создает в ускорительном канале магнитное поле, основная компонента которого  $B_z$  направлена нормально к поверхностям электродов. Эта компонента, взаимодействуя с разрядным током  $j_y$ , создает объемную электромагнитную силу  $f_x = j_y \times B_z$ , направленную вдоль оси потока. Образующаяся плазма ускоряется электромагнитной силой до скорости  $V = (20 \dots 30)$  км/с.



$J$  – ток разряда;  $B$  – поперечное собственное магнитное поле;  $F$  – объемная электромагнитная сила.

**Рисунок 1.** Принципиальная схема АИПД рельсовой геометрии с боковой подачей плазмообразующего вещества (фторопласта)

Особенностью абляционного двигателя является то, что разряд в ускорительном канале одновременно выполняет функции дозирования плазмообразующего вещества и ускорения плазмы. При этом, как было экспериментально показано еще на первом этапе развития АИПД, интегральный расход рабочего тела за импульс пропорционален энергии разряда  $W$  [1].

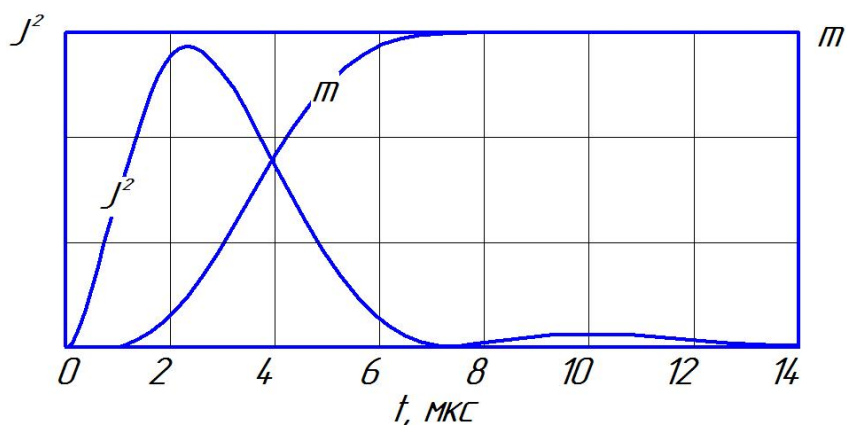
$$m \sim k \cdot W = k \cdot \frac{C \cdot U_0^2}{2},$$

где  $k$  – коэффициент пропорциональности, зависящий от конструкции двигателя и режима его работы, в частности от размеров и геометрии разрядного канала, типа разряда

(осциллограммы разрядного тока) и температуры рабочих поверхностей,  $U_0$  – напряжение,  $C$  – емкость конденсаторной батареи.

Электродинамический КПД АИПД в значительной степени определяется отношением емкости конденсаторной батареи к начальной индуктивности разрядной цепи  $L_0$ . Определение значений отношения  $C/L_0$ , обеспечивающих высокие удельные характеристики двигателя, требует длительных экспериментальных исследований. Конкретные величины  $C/L_0$  защищены принадлежащим НИИ ПМЭ патентом [5].

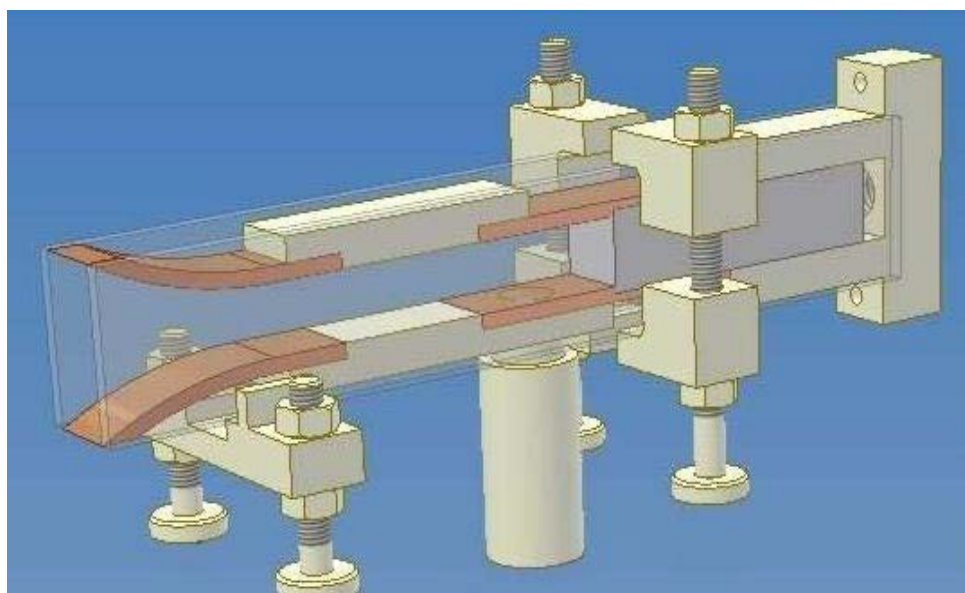
Однако высокий электродинамический КПД является необходимым, но далеко не достаточным условием получения высоких удельных характеристик. Причиной является упомянутая двойная функция разряда в ускорительном канале – одновременное и самосогласованное дозирование и ускорение рабочего тела. На Рисунке 2 представлены временные зависимости ввода в разрядный канал мощности (пропорциональна квадрату разрядного тока  $J^2$ ) и массы  $m$  плазмообразующего вещества, полученные в НИИ ПМЭ в результате пьезозондовых измерений на одном из лабораторных образцов АИПД.



**Рисунок 2.** Динамика ввода мощности разряда  $J^2$  и массы  $m$  плазмообразующего вещества в разрядный канал АИПД

Как показывает зависимость  $J^2(t)$ , разряд носит квазипериодический характер, что свидетельствует о работе двигателя с высоким электродинамическим КПД. Тем не менее, наблюдается существенное временное рассогласование ввода энергии и массы в ускорительный канал. Значительная часть массы плазмообразующего вещества поступает в канал уже после того, как разряд практически завершился. Эта часть плазменного потока ускоряется только до тепловых скоростей, что приводит к снижению удельного импульса и тяговой эффективности двигателя. Данную проблему можно решить, разделив процессы формирования плазменного сгустка и его ускорения. Как вариант, был рассмотрен АИПД рельсовой схемы, в котором дозирующая и ускоряющая ступени расположены последовательно друг за другом (Рисунок 3). Пара электродов, расположенных в глубине разрядного канала используются для создания сгустка плазмы, который, покидая разрядный

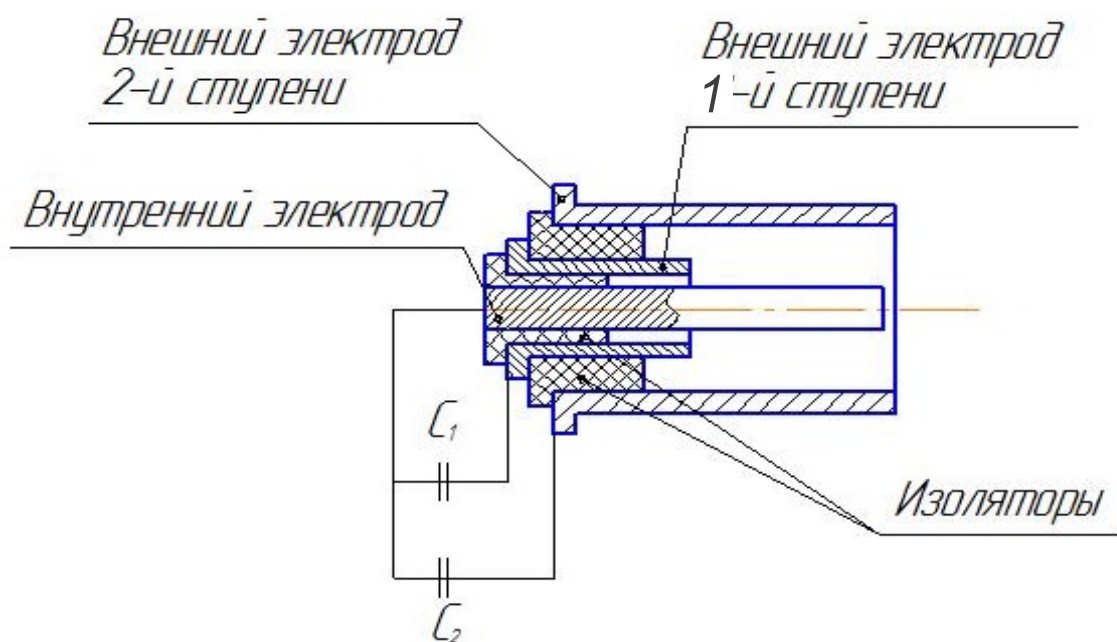
канал дозирующей ступени, попадает в область ускоряющих электродов, где разгоняется до высоких скоростей.



**Рисунок 3.**

Данный двигатель имеет довольно большие линейные размеры и, как было указано в источнике, модель условно работоспособна, по причине быстрого науглероживания межэлектродных изоляторов [5].

Еще один вариант абляционного двигателя с разделенными фазами образования и ускорения плазмы - двухступенчатый коаксиальный АИПД (Рисунок 4).



**Рисунок 4.** Принципиальная схема двухступенчатого коаксиального АИПД.

В данном двигателе электроды расположены соосно, в центре находится катод, внешний цилиндр - анод, между ними находится фторопластовая шашка рабочего тела, которая одновременно является изолятором. Очевидно, что подобная схема подачи рабочего тела обладает рядом существенных недостатков, которые у двигателей на базе АИПД

рельсовой конфигурации с боковой или торцевой подачей рабочего тела отсутствуют. В процессе выработки фторопласта изменяется форма аблирующей поверхности шашек рабочего тела, что приводит к ухудшению характеристик двигателя при его длительной эксплуатации.

В качестве альтернативного варианты был разработан абляционный импульсный плазменный двигатель рельсовой схемы с разрядным каналом, совмещающем в себе дозирующую и ускоряющую ступени. Основным отличием данной модели является комбинированный разрядный канал, в котором дозирующая и ускоряющая ступени имеют общий электрод (катод) и различные аноды. Данное техническое решение позволило значительно сократить линейные размеры АИПД, избежать науглероживания керамического изолятора, обеспечить непрерывную подачу рабочего тела в разрядный канал.

К дозирующей и ускоряющей ступеням энергия подводится от двух конденсаторных накопителей разной емкости, которые могут находиться как под одним, так и под разными потенциалами. Таким образом, существует возможность варьировать энергии разряда на стадии формирования плазменного сгустка и на стадии его ускорения.

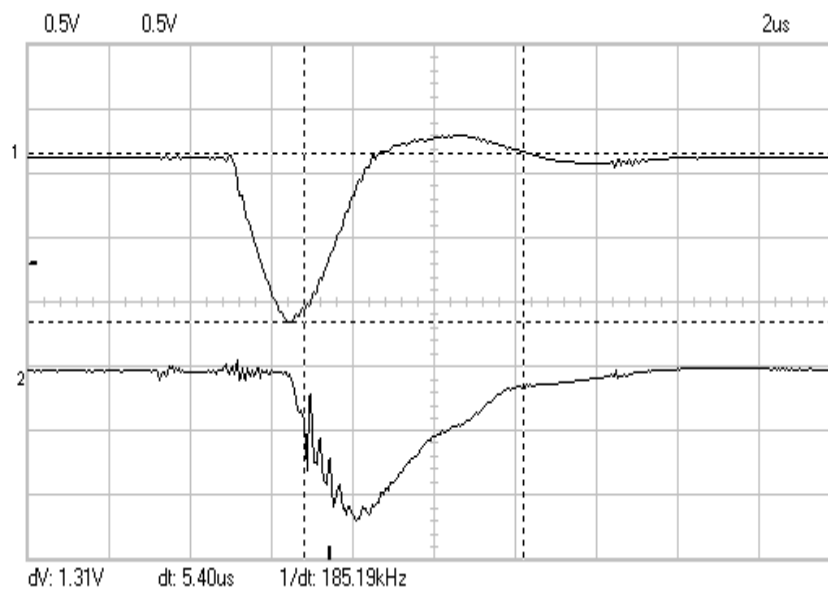
Процесс формирования плазменного сгустка в разрядном канале дозирующей ступени идентичен процессу в традиционном АИПД рельсовой схемы. При достижении плазменным сгустком границы керамического изолятора, замыкается межэлектродный промежуток ускоряющей ступени и происходит дополнительное ускорение плазмы.



**Рисунок 5.** Фотография разрядного канала двухступенчатого АИПД рельсовой схемы

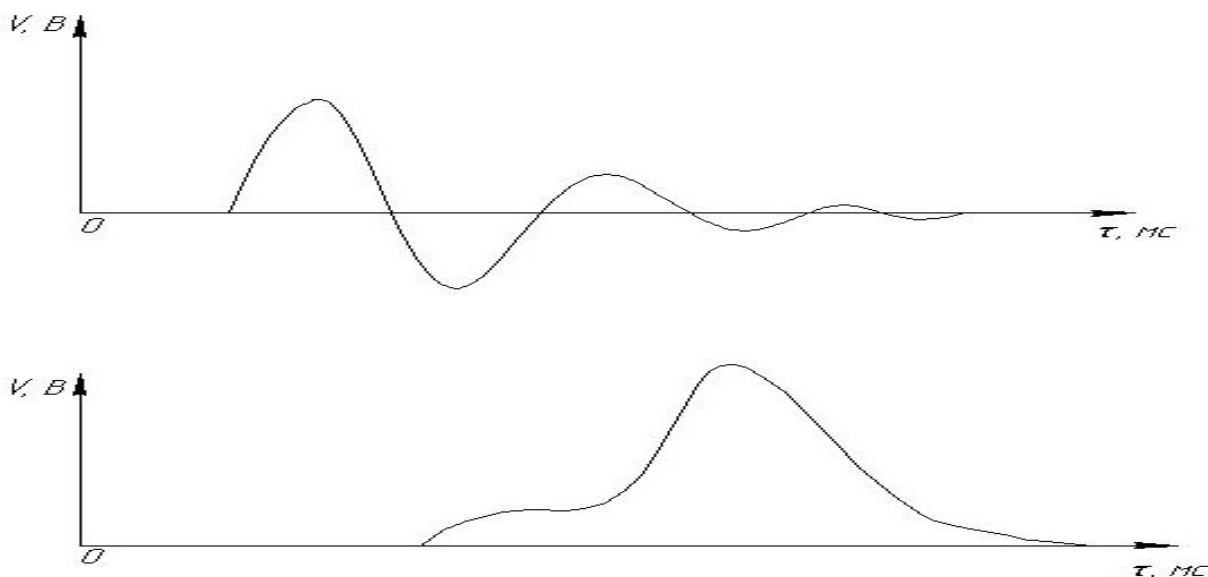
В результате экспериментов было установлено наличие утечек тока с ускоряющей ступени на дозирующую. Из осциллограммы (Рисунок 6.) видно, что в цепи ускоряющей ступени (нижняя осциллограмма) ток начинает течь в тот момент, когда ток, протекающий в

дозирющей (верхняя осциллограмма) ступени, достигает своего максимума, далее происходит переполюсовка электродов дозирующей ступени. В этот момент времени электроды, разделенные керамическим изолятором, оказываются под противоположными потенциалами, что приводит к перетеканию тока и, как следствие, к падению тяговых характеристик двигателя.



**Рисунок 6.** Осциллограммы токов, протекающих в разрядах ионизирующей и ускоряющей ступеней двухступенчатого АИПД.

В результате оптимизации геометрических параметров разрядного канала и электротехнических параметров цепи удалось значительно уменьшить потери на перетекание тока с ускоряющей ступени на дозирующую, благодаря разделению во времени процессов создания плазменного сгустка на первой ступени и его ускорения на второй. Из приведенных осциллограмм (Рисунок 7) видно, что процесс ускорения (нижняя осциллограмма) начинается тогда, когда основная часть электрической энергии дозирующей ступени уже выделилась в разрядном канале.



**Рисунок 7.** Осциллограммы токов, протекающих в разрядах ионизирующей и ускоряющей ступеней двухступенчатого АИПД после модернизации.

В таблице приведены характеристики, полученные в ходе отработки и оптимизации лабораторной модели с двухступенчатой системой ускорения плазмы.

**Таблица.** Интегральные характеристики АИПД с двухступенчатым механизмом ускорения рабочего тела.

Вариант №	W(дозирующая) (Дж)	W (суммарная) (Дж)	P(доз.) (мНс)	P(двухступ.) (мНс)	m (мг/имп.)
1	20	62,7	-	0,3	0,042
2	10	52,7	0,12	0,28	0,021
3	8	50,7	0,082	0,37	0,0168

Видно, что наилучшие характеристики были получены при минимальной энергии разряда дозирующей ступени (строка №3).

В настоящее время работа по усовершенствованию двухступенчатого АИПД продолжается. Основная цель - создание экспериментального образца АИПД, для возможного последующего практического применения.



## Библиографический список

1. *Дмитриенко Б. И., Лесков Л. В., Савичев В. В., Трехов Е. С. и др.* Исследование абляции диэлектрика скользящим разрядом в импульсных ускорителях // Плазменные ускорители. М.: Машиностроение, 1973.
2. *Антропов Н.Н., Богатый А.В., Дьяконов Г.А., Орлов М.М. и др.* Разработка абляционных импульсных плазменных двигателей в НИИ прикладной механики и электродинамики // Космонавтика и ракетостроение, 2008. № 6.
3. *Арцимович Л.А., Лукьянов С.Ю., Подгорный И.М., Чуватин С.А.* Электродинамическое ускорение сгустков плазмы // Физика и применение плазменных ускорителей. –Минск: Наука и техника, г. 1974. С. 8-16.
4. *Богатый А.В., Дьяконов Г.А., Нечаев И.Л.* Разработка абляционного импульсного плазменного двигателя с двухступенчатой схемой ускорения плазмы // XXXV Академические чтения по космонавтике. М., 2011. С. 113-114.
5. Патент РФ № 2253953, H05H 1/54, F 03H 1/00 от 10.06.2005 г.
6. *Rodrigo Marques, Stephen Gabriel and Fernando Costa* HIGH FREQUENCY BURST PULSED PLASMA THRUSTER RESEARCH AT THE UNIVERSITY OF SOUTHAMPTON // The 30th International Electric Propulsion Conference, Florence, Italy, September 17-20, 2007.

## **Сведения об авторах**

БОГАТЫЙ Александр Владимирович, научный сотрудник Московского авиационного института (национального исследовательского университета), тел.: (499) 158-45-10, 8-926-752-98-56; e-mail: [boga-alex@ya.ru](mailto:boga-alex@ya.ru)

МАИ, Волоколамское ш., 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993;

ДЬЯКОНОВ Григорий Александрович, старший научный сотрудник Московского авиационного института (национального исследовательского университета), к.т.н., тел.: (499) 158-45-10; e-mail: [riame3@sokol.ru](mailto:riame3@sokol.ru)

МАИ, Волоколамское ш., 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993.

НЕЧАЕВ Иван Леонидович, студент Московского авиационного института (национального исследовательского университета), тел.: (499) 158-45-10

МАИ, Волоколамское ш., 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993;

## **The ablative pulsed plasma thruster (APPT) with the divided mechanism of plasma ionization and acceleration**

Bogatyy A. V., Dyakonov G. A., Nechayev I. L.

### **Annotation**

Paper is devoted to the perspective direction of development of ablative pulse plasma thrusters (APPT) – engines with two-stage system of acceleration of a working body. The principle of action of APPT's, various types of thrusters, their merits and demerits, possibilities of increase of there characteristics and problems accompanying are considered.

### **Keywords:**

electrorocket thruster; the ablative pulse plasma thruster; the plasma accelerator; the plasma source; the small space vehicle

BOGATYY Alexander V., researcher of Moscow Aviation Institute (National Research University), phone: (499) 158-45-10; e-mail: [boga-alex@ya.ru](mailto:boga-alex@ya.ru)

MAI, Volokolamskoye shosse, 4, Moscow, Russian Federation, A-80, GSP-3, 125993.

125993. DYAKONOV Grigoryy A., senior researcher of Moscow Aviation Institute (National Research University), Candidate of Engineering Science phone: (499) 158-45-10; e-mail: [riame3@sokol.ru](mailto:riame3@sokol.ru).

MAI, Volokolamskoye shosse, 4, Moscow, Russian Federation, A-80, GSP-3, 125993/

NECHAYEV Ivan L., student of Moscow Aviation Institute (National Research University), phone: (499) 158-45-10

MAI, Volokolamskoye shosse, 4, Moscow, Russian Federation, A-80, GSP-3, 125993.

