

КОРОТКИЙ ЗВІТ

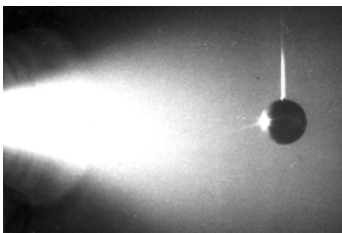
Цільова комплексна програма НАН України з наукових космічних досліджень на 2012-2016 рр.

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

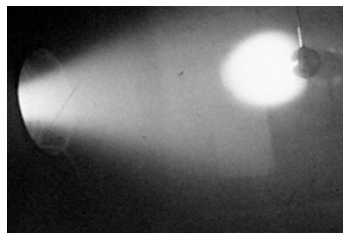
Науковий проект «Дослідження особливостей і механізмів керування орбітальним рухом КА в середовищі, яке проводить струм», етап 3 „Дослідження динаміки та теплообміну магнітоелектродинамічних систем в іонізованому середовищі в атмосфері Землі”

За напрямом 1 „Керування теплообміном «намагніченого» твердого тіла в атмосфері Землі за допомогою власного магнітного поля ”

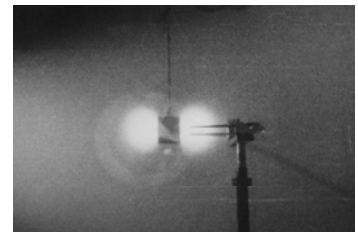
Розроблено постановку експерименту і конструктивну схему «намагніченого» (із власним магнітним полем) твердого тіла для моделювання конвективних теплових потоків на його поверхню в надзвуковому потоці розрідженої плазми. Показано, що для підвищення ефективності застосування магнітогідродинамічних (МГД) систем при керуванні динамічною взаємодією, рухом КА під «магнітним парашутом» або «магнітним парусом», необхідно збільшити силу Лоренца $\vec{F} = \vec{j} \times \vec{B}_w = [(eN_i \vec{U}_\infty) \times \vec{B}_w]$, яка діє на «намагнічене» тіло в потоці розрідженої плазми. При жорсткому обмеженні величини індукції власного магнітного поля КА для збільшення сили Лоренца, як альтернатива, може бути використано підвищення концентрації заряджених часток біля твердої поверхні в плазмі за ударною хвилею перед СА (апарати, що спускаються в атмосфері Землі) і КА в іоносфері та в міжпланетному просторі. Розроблено принципову схему пристрою, методику і процедуру створення штучних плазмових утворень (ШПУ) біля поверхні твердого тіла (моделі) у надзвуковому потоці частково іонізованого газу. Процедура включає інжекцію газоподібних продуктів піролізу плазмоутворюючої речовини з поверхні твердого тіла з наступною іонізацією їх електронами потоку частково іонізованого газу. Показано, що створювані у такий засіб на стенді ІТМ НАНУ і ДКАУ штучні плазмові утворення мають концентрацію заряджених часток на (2 – 2,5) порядки вище, ніж у потоці розрідженого частково іонізованого газу, що набігає на тверде тіло. Поле течії та ШПУ біля поверхні твердого тіла у надзвуковому потоці розрідженої плазми на стенді ІТМ, який має статус наукового об'єкта „національне надбання” показано на рис. 1, а – в.



а



б



в

Рисунок 1 – Поле течії (а) та ШПУ (б, в) біля поверхні твердого тіла у надзвуковому потоці розрідженої плазми на стенді ІТМ

Розподіл концентрації електронів в ШПУ в радіальному та подовжньому напрямках приведено на рис. 2. Структури таких ШПУ подібні до просторового розподілу іонів і електронів у плазмових струменях, які генерують електрореактивні двигуни КА (рис. 3).

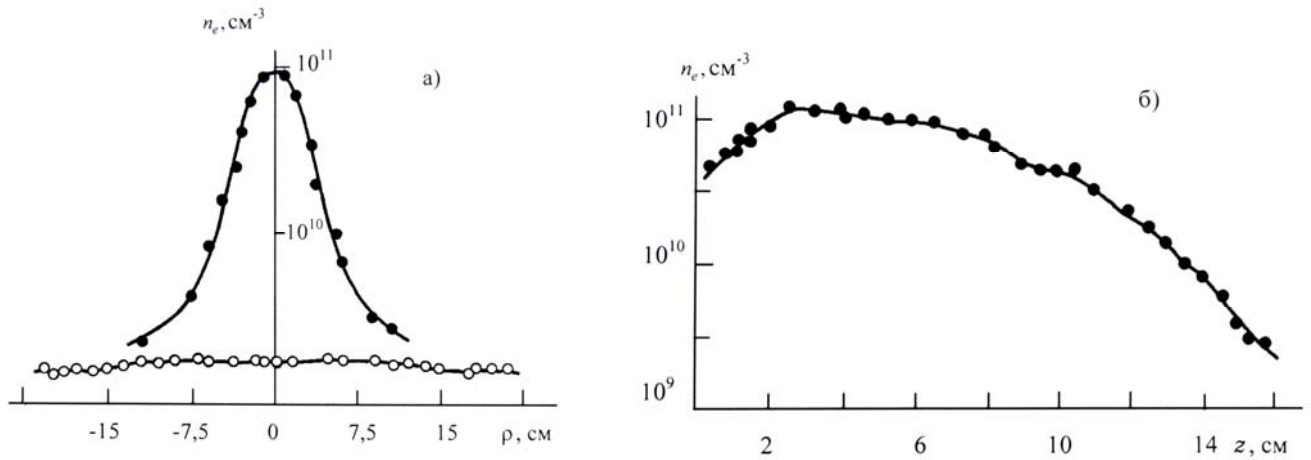
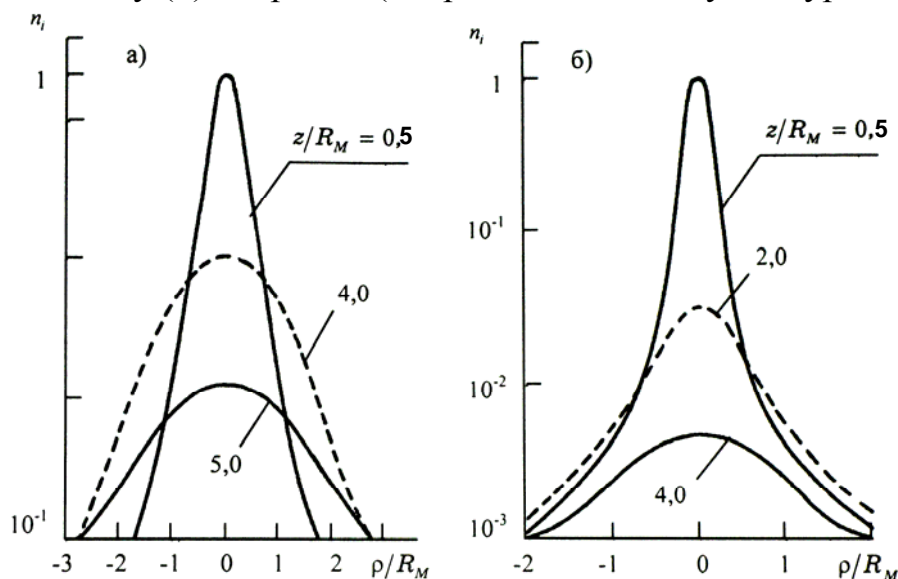


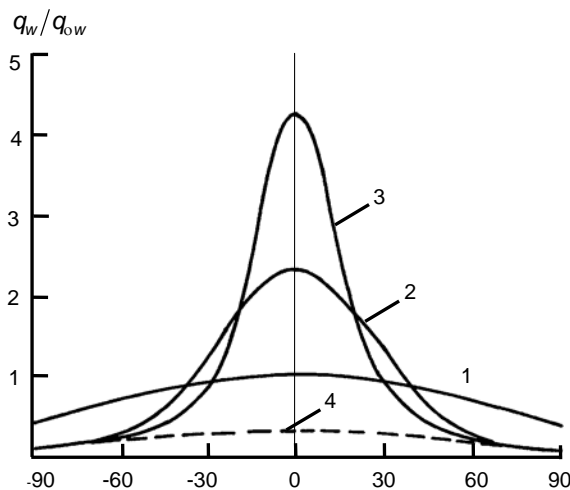
Рисунок 2 – Розподіл концентрації електронів в ШПУ в радіальному (а) та подовжньому (б) напрямках (2 – розподіл часток у незбуреній плазмі)



а – ІТМ; б – супутник „Метеор”

Рисунок 3 – Розподіл заряджених часток в ШПУ

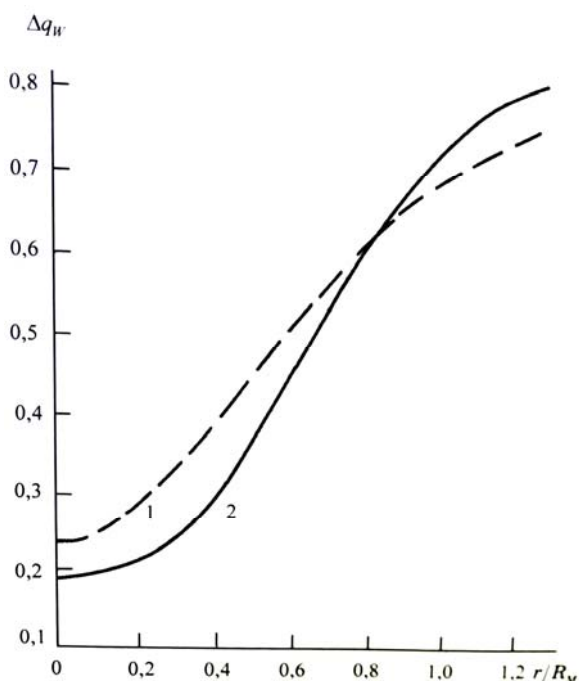
Проведено експериментальні дослідження з теплообміну «намагніченого» тіла в надзвуковому потоці частково іонізованого газу для умов, що моделюють взаємодію СА з атмосферою Землі. Магнітогідродинамічний ефект – зменшення конвективних теплових потоків на поверхню затупленого тіла на (20 – 60) % має місце для чисел Стюарта $1 < Q_B \leq 10^3$ біля критичної точки в діапазоні кутів $\pm 15^\circ$. На периферійній частині затупленої поверхні „намагніченого” тіла зменшення конвективних теплових потоків наближується до 100%. Встановлено, що ШПУ біля поверхні твердого „намагніченого” тіла послаблює вплив МГД-ефекту на теплообмін у критичній точці для діапазону кутів $\pm 30^\circ$ (рис. 4).



1 – „ненамагнічене” тіло ($B_w = 0$);
 „намагнічене” тіло ($B_w \neq 0$) в
 присутності біля його поверхні ШПУ:
 2 – $Q_B = 10^2$; 3 – $Q_B = 10^3$;
 4 – радіаційне нагрівання
 випромінюванням плазми

Рисунок 4 – Зміна теплових потоків на поверхні діелектричної „намагніченої” півсфери в присутності ШПУ біля її поверхні

Показано, що результати фізичного модельного експерименту з теплообміну «намагніченого» твердого тіла в надзвуковому потоці розрідженої плазми на стенді ІТМ НАНУ і ДКАУ погоджуються з даними чисельного рішення задачі (рівняння Нав'є-Стокса з рівнянням Максвелла) для КА „OREX” на висотах (60 – 75) км – у критичній точці погрішність не більш 5 %, для периферійної частини поверхні 15 % (рис. 5).



1 – експеримент ІТМ;
 2 – чисельний експеримент
 для сегментально-конічного
 КА „OREX” (Японія)

Рисунок 5 – Зміна теплових потоків $\Delta q_w = |1 - q_{Bw}/q_{0w}|$ на поверхню „намагніченого” тіла (q_{Bw} – потік при $B_w \neq 0$, q_{0w} – при $B_w = 0$; r/R_w – поточна нормована координата поверхні)

Подальші дослідження: Визначення впливу ШПУ на гальмування або прискорення „намагніченого” тіла під час руху в атмосфері, іоносфері Землі та у міжпланетному просторі.

Публікації за етапом 3:

1. Control of the Dynamic Interaction of a “Magnetized” Sphere with a Hypersonic Flow of Rarefied Plasma / V. A. Shuvalov, N. A. Tokmak, N. I. Pis'mennyi, and G. S. Kochubei // High Temperature. – 2015. – V. 53, №. 4. – P. 463 – 469, N.Y., Pleiades Publishing Ltd. – 2015, DOI: 10.1134/S0018151X15030177.

2. Магнетогидродинамическое управление теплообменом и торможением спускаемых аппаратов в атмосфере Земли / В. А. Шувалов, Н. И. Письменный,

А. Г. Цокур, А. А. Пурцеладзе // Космические технологии : настоящее и будущее : 5-ая Международная конференция, май, 2015 г., Днепропетровск : тезисы докладов. – Днепропетровск : КБЮ. – С. 26.

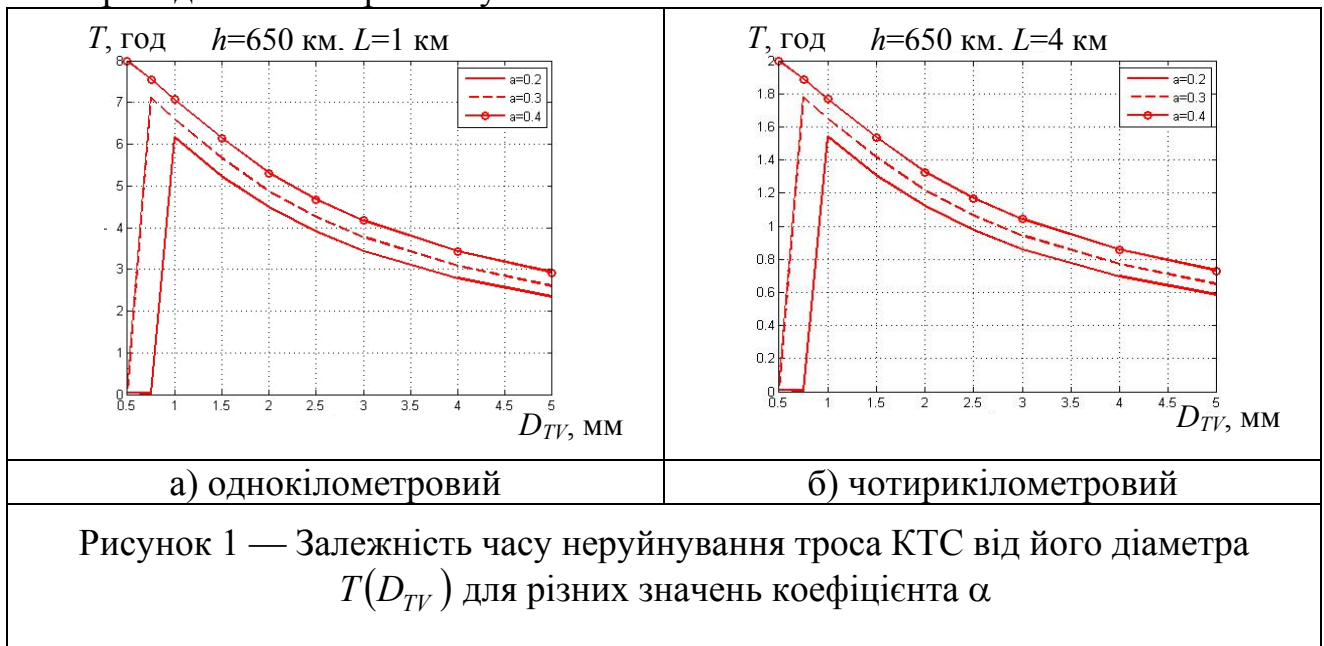
3. Резниченко Н. П. Управление движением спускаемых аппаратов под „магнитным парашютом” в атмосфере Земли / Н. П. Резниченко, Н. И. Письменный, А. Г. Цокур // 15-а Українська конференція з космічних досліджень, 24 – 28 серпня 2015 р., Одеса : тези доповідей. – Київ : „Академперіодика” НАН України, 2015. – С. 115.

За напрямом 2 „Нелінійна динаміка і особливі фактори взаємодії з середовищем електродинамічної космічної тросової системи.”

1. Розрахунок часу існування космічної тросової системи на низькій навколосеземній орбіті при впливі частинок космічного сміття

На основі раніше розробленої методики побудовано комп'ютерні алгоритми визначення імовірнісних оцінок середнього часу неруйнування космічних тросових систем (КТС) при зіткненні з частинками космічного сміття. Інтенсивність потоків часток розраховується за допомогою відомих комп'ютерних моделей ORDEM, MASTER.

Отримано оцінки середнього часу неруйнування КТЗ з моноволоконним і двоволоконним тросом залежно від параметрів орбіт і конструкційних характеристик системи. Показано, що для відомих проектів SEDS-2 і TiPS запропонована методика дає дещо завищені оцінки часу неруйнування троса. Тим не менш, вона дозволяє оцінювати вірогідність часу неруйнування троса, і вибирати конструктивні параметри троса згідно завданню створення КТС. Показано, що для малої експериментальної тросової системи протяжністю 1000 м і діаметром троса більше одного міліметра час, при якому з великою ймовірністю (> 0.75) трос не буде зруйновано, значно перевершує запланований час проведення експерименту.



2. Дослідження нелінійних коливань тросової системи відносно центру мас під дією аеродинамічного моменту

Вплив аеродинамічного моменту на нелінійні коливання тросової системи відносно центру мас суттєво залежить від параметрів системи і обраної орбіти,

але у багатьох випадках розвиток резонансних коливань системи досить повільний і тросова система за певних умов може виконати свою місію до настання коливань з великою амплітудою.

3. Дослідження нелінійних коливань тросової системи відносно центру мас під дією моменту амперових сил.

Дороблено та розвинено математичні і комп'ютерні моделі динаміки електродинамічної космічної тросової системи, в тому числі, враховано зміни орбітального руху на відносний та розроблено схему включення моделі International Reference Ionosphere в розрахункову програму динаміки. Показано:

– складність задач нелінійної динаміки ЕДКТС під дією амперових сил і її багатопараметричний характер вимагають ретельного аналізу стійкості відносного руху кожної конкретної місії;

– при розгортанні тросової системи необхідно забезпечити невеликі початкові кути відхилення від місцевої вертикалі. Бажано, щоб система розгортання ЕДКТС давала первісний кут відхилення не більше 20 градусів лінії троса від місцевої вертикалі. У цьому випадку зростання амплітуди коливань досить повільне;

– для зменшення моменту амперових сил потрібно, щоб позитивно заряджена частина тросової системи включала більш важкий тверде тіло;

– практично у всіх розглянутих випадках для малої експериментальної ЕДКТС нестійкість коливань настає досить повільно, що дозволяє провести експериментальні дослідження за допомогою малої ЕДКТС протягом, принаймні, 10 витків руху системи по орбіті.

На рис. 2 наведено графіки змін кутів орієнтації лінії троса відносно місцевої вертикалі: кута відхилення від площини орбіти θ і кута відхилення в площині орбіти φ .

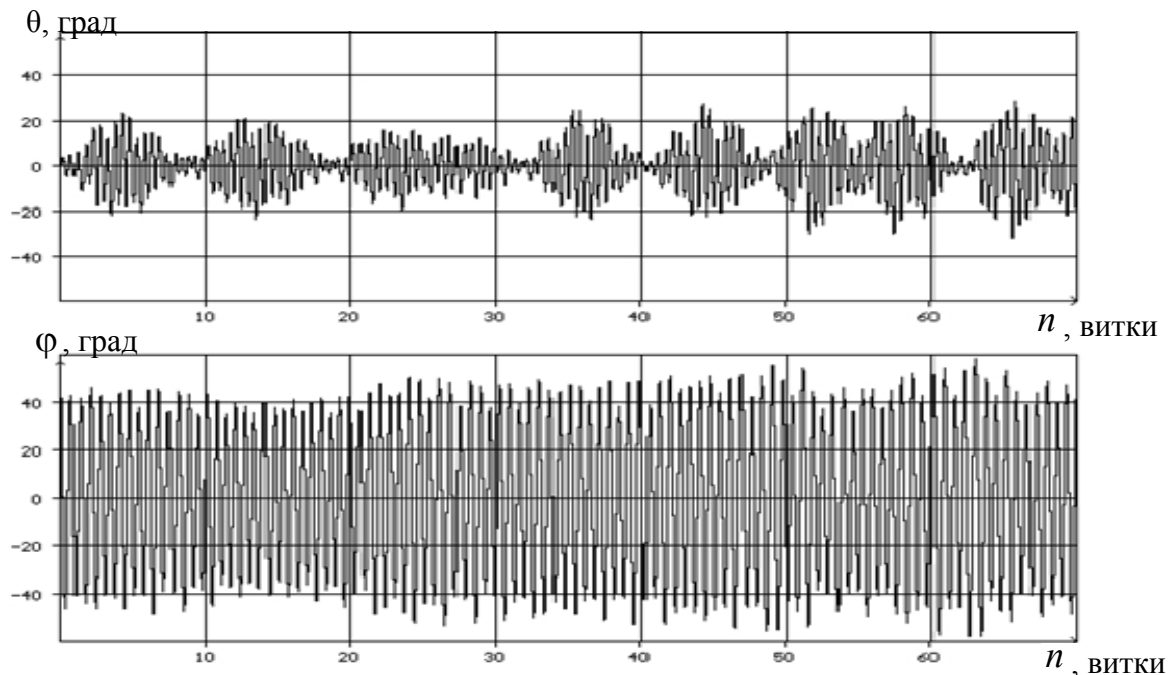


Рисунок 2 – Нестійкість коливань відносно місцевої вертикалі при $i=0$, $h=550$ км, $\varphi_0 = 47$ град, $\theta_0 = 0$.

4. Аналіз динаміки космічної тросової системи з урахуванням теплового впливу

Виконано аналіз і розрахунок теплових потоків, що впливають на КТС при її русі по низькій навколосеземній орбіті з урахуванням маси троса і можливості попадання системи в тінь Землі. Результати розрахунків показали, що тепловий вплив не надає істотного впливу на динаміку малих КТС з довжиною зв'язку порядку одиниць кілометрів. На рис. 3 представлено графік зміни в часі різниці між координатами верхньої кінцевої маси, отриманими з урахуванням теплового впливу та без його урахування. Видно, що на тіньовій ділянці орбіти, коли КТС остигає, її довжина скорочується. Величина цього скорочення досягає 0,3% номінальної довжини КТС.

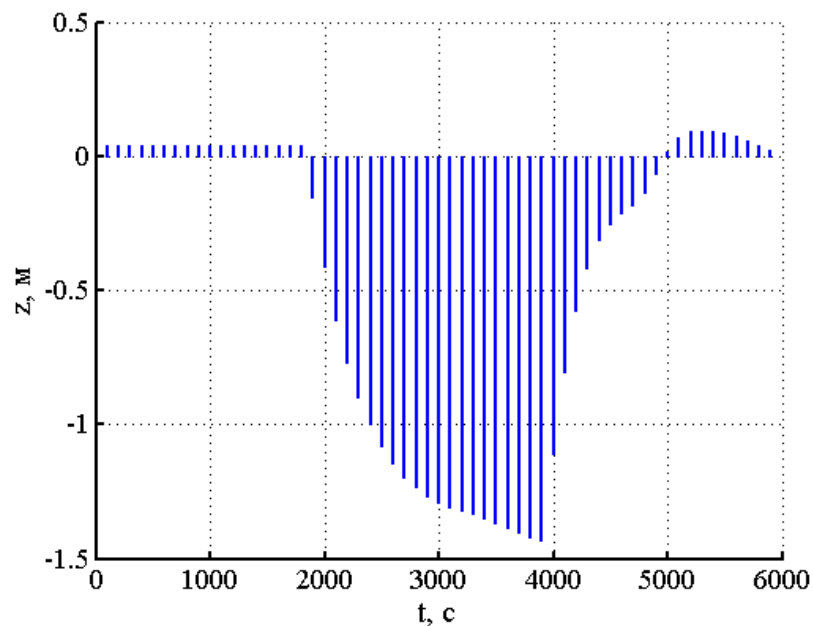


Рисунок 3 – Різниці між положеннями верхнього кінцевого тіла КТС з урахуванням і без урахування нагріву троса (вісь z спрямована уздовж місцевої вертикалі)

Врахування теплових впливів на динаміку протяжних і надпротяжних КТС, довжина зв'язку яких становить десятки і більше кілометрів, а також питання впливу параметрів матеріалу троса, зокрема, ступеня чорноти і коефіцієнта поглинання випромінювання, на його нагрівання потребують додаткових досліджень.

Публікації за етапом 3:

1. Пироженко А. В. Проект малой электродинамической космической тросовой системы как проект молодежного спутника / А.В. Пироженко, А.В. Мищенко // "Актуальные проблемы российской космонавтики"; Материалы XXXIX академических чтений по космонавтике. — Москва, январь 2015. — С. 379.

2. Маслова А. И. Исследования закономерностей динамики электродинамической космической тросовой системы для определения возможности создания высокоэффективного устройства пассивного увода космического мусора с низких околоземных орбит / А. И. Маслова,

А. В. Мищенко, А. В. Пирожено, Д.А. Храмов // Космічна наука і технологія. – 2015. — Т. 21, № 1. — С. 20 – 24.

3. Маслова А. И. Модель движения малой радиальной космической тросовой системы под действием аэродинамического момента / А. И. Маслова // Техническая механика. — 2015. — № 1. — С. 55 – 64.

Наукові керівники проекту:

за напрямом 1
доктор технічних наук, професор

Шувалов В. О.

за напрямом 2
доктор технічних наук, професор

Алпатов А. П.