

М.Қ. Досболаев , Е.А. Үсенов 

Қолданбалы ғылымдар және ақпараттық технологиялар институты  
Алматық.-сы, Қазақстан  
e-mail: [merlan@physics.kz](mailto:merlan@physics.kz)

## ҚАТТЫ ОТЫНДЫ ИОНДЫ-ПЛАЗМАЛЫ ҚОЗҒАЛТҚЫШТЫҢ МОДЕЛІ ЖӘНЕ ОНЫҢ ЖҰМЫС ІСТЕУ ПРИНЦИПІН ЗЕРТТЕУ

**Андатпа.** Қарастырылып отырған жұмыста қатты отынды ионды-плазмалы қозғалтқыштың моделі және оның жұмыс істеу принципі туралы мәліметтер келтірілген. Қатты отынмен жұмыс істейтін ионды-плазмалы қозғалтқыштың электродтар жүйесінің жаңа моделі дайындалды. Ол екі бөліктен тұрады: плазма ағыны үдетілетін жоғары вольтты электродтар, рельсотрон принципіне негізделіп жұмыс істейді, ал жоғары амперлі тұтандырушы электрод, плазма тудырушы қызметін атқарады. Тұтандырушы электродтың жерге жалғанған электродпен жанасуы механикалық әсер арқылы жүзеге асырылады. Алғашқы эксперименттерде тұтандырушы электрод ретінде графит пластинасы қолданылды. Осылайша тұтандырушы электрод тудыратын электрлік ұшқын, ұшқын разряд түрінде пайда болатыны анықталды. Бұл тұтандырушы электродты қатты отын ретінде қолдануға болатындығын көрсетеді. Тұтандырушы электродтың электрлік қысқа тұйықталуы кезінде пайда болатын ұшқын разряд негізгі ионды-плазмалы ағынды тудырады. Ол өз кезегінде өздік магнит өрісі тудыратын магниттік қысым әсерінен үдеп, жоғары жылдамдыққа ие болады. Экспериментте анықталған ионды-плазмалы ағынның орташа жылдамдығы 4,5 км/с тең болды. Бұл шектік мән емес әрине. Сонымен қатар, эксперименттер барысында ионды-плазмалы ток каналының үзілуін униполяр доғалы разряд тудыратыны, және оның салдарынан жоғары вольтты электрод беті күшті эрозияға ұшырайтындығы белгілі болды.

**Түйін сөздер:** Ұшқын разряд, рельсотрон, плазмалық ағын, униполяр доғалы разряд, плазманың үдеуі.

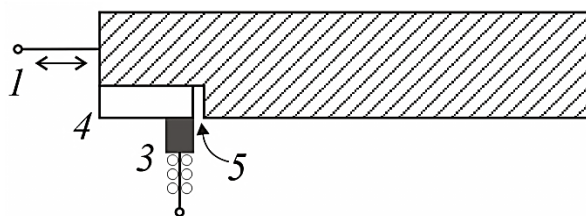
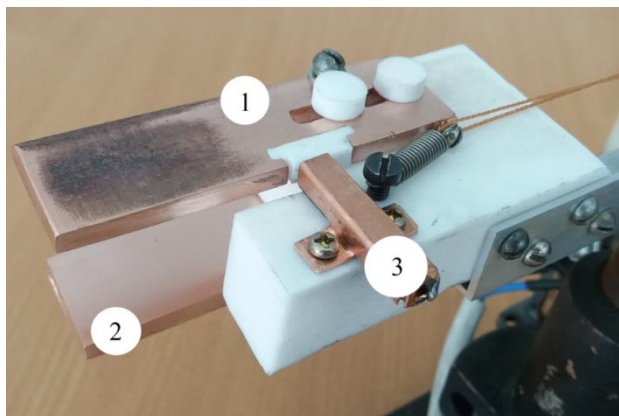
### Кіріспе.

Соңғы жылдары ғылыми-техникалық зерттеулер саласындағы әлемдік ғарыш нарығының дамуы, навигация, спутниктік байланыс және т.с.с. салаларда көлемі ықшам ғарыш аппараттарының сипаттамаларын жақсарту тенденциясының күшеюіне әкелді [1]. Қазірдің өзінде наноспутник сияқты шағын ғарыштық техниканы қолдану, сенімді, аз қуаты импульсті плазмалық қозғалтқыштарды дайындауда және оның жұмыс параметрлерін жақсартуда үлкен қызығушылықтар тудырып отыр [2-15]. Импульсті плазмалық қозғалтқыштар плазмалық отынды, өздік магнит өрісінен туатын Лоренц күшін қолдана отырып, мүмкіндігінше жылу және электр магниттік шығындарды азайта отырып үдетеді [9]. Мұндай құрылғылардың

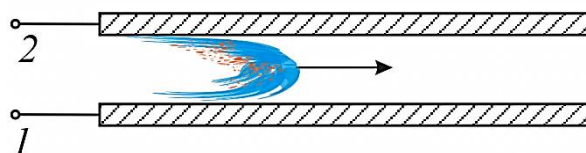
импульсті жұмысының тағы бір маңызды артықшылығы - бұл жоғары импульсті разрядты токтарда жұмыс істеу қабілетімен қамтамасыз етілетін тарту күшінің жоғарылауы. Осы бағыттағы зерттеулердің жай-күйі көптеген ғылыми еңбектерде көрініс тапқан. Сондықтан, импульсті плазмалы қозғалтқыштарды тиімді пайдалану және осы құрылғының сипаттамаларын жақсарту туралы мәселелер әлі де егжей-тегжейлі зерттеулерді талап етеді.

### Эксперименттік қондырғы және зерттеу әдістері туралы

Эксперименттік қондырғының негізгі бөлігі – электродтар жүйесінің шынайы суреті және принциптік схемасы сәйкесінше 1а және 1 б суреттерінде көрсетілген.



ә) электродтар жүйесінің үстінен қарағандағы принциптік схемасы



а).

б)

а) электродтар жүйесі. Суреттің ұзындығы 13 см.

б) электродтар жүйесінің жанынан қарағандағы принциптік схемасы

- 1 – жерге жалғанған ортақ электрод.
- 2 – жоғары вольтты электрод.
- 3 – тұтандырушы, қысқа тұйықталатын электрод.
- 4 – фторопласт изолятор.
- 5 – окшаулауыш саңылау.

1-сурет. Электродтар жүйесінің шынайы суреті және принциптік схемасы.

Ионды-плазмалық қозғалтқыштың негізгі бөлігі, электродтар жүйесі. Жоғары вольтты электродтар қалыңдығы 5 мм мыс пластиналардан, ал тұтандырғыш, электрлік ұшқын тудыратын электрод графит стерженьнен дайындалған. Соңғысы қатты отын ретінде қазмет атқарады. Электродтар жүйесі толықтай вакуумдық камера ішінде орналасады. Майсыз жұмыс істейтін диафрагмалық және турбомолекулалық сорғылардың көмегімен  $10^{-3}$  торр деңгейінде вакуум алынады. Бұл 1000 км биіктіктегі ғарыштық вакуумға пара-пар. Ионды-плазмалық қозғалтқыштың жұмыс істеуі келесі процесстердің ретпен орындалуына негізделген. Бірінші релсотрон типті орналасқан өзара параллель электродтарға 2 кВ шамасында кернеу түсіріледі. Жерге жалғанған ортақ электродтың 1ә суретте көрсетілгендей бағытта қозғала алатын, және 3 электродқа қатысты тартылған және босатылған екі күйде бола алатын мүмкіндігі бар. Ол босатылған күйде тұтандырушы электрод жерге жалғанған мыс электродтың бүйірінде орналасқан фторопластпен (4ә суреті) беттесіп, тұтандырушы электрод тізбегі

электрлік ажыратулы болады. Ал тартылған күйде алдын-ала зарядталған конденсаторға жалғанған тұтандырушы электрод жерге жалғанған электродпен жанасып, қысқа тұйықталып, электрлік ұшқын пайда болады. Электрлік ұшқынды разряд жоғары кернеу түсірілген электродтар аралығына түскен бетте негізгі плазмалық ағын пайда болып, ол релсотрон типті орналасқан өзара параллель электродтар аралығымен үдей түсіп (1б суретте) тартушы күш тудырады.

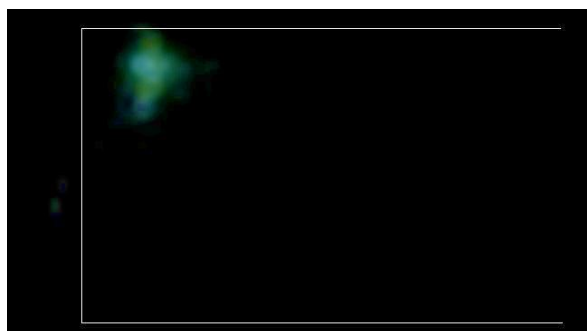
Плазмалық ағынның және эрозия кезіндегі тозанды макробөлшектердің қозғалысы v2512 типті Phantom жоғарғы жылдамдықты камерасы көмегімен видеоға түсірілді түсірілді. Бұл эксперименттерде максимал түсіру жылдамдығы 420000 кадр/с болды.

#### Эксперимент нәтижелері және талқылаулар

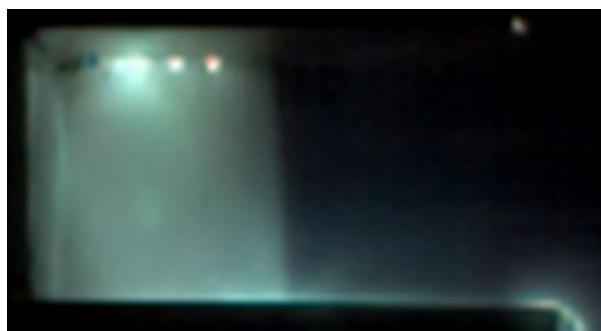
Плазмалық қозғалтқышта негізгі плазмалық ағынның пайда болуы үшін қысқа тұйықталу кезінде электрлік ұшқының жоғары вольтты электродтар аралығына шашырау қажет. Осылайша электрлік ұшқын жоғары вольтты

электродтар аралығында электрондық көшкіннің дамуына септігін тигізеді. Сонымен қатар, плазманың жануына отын береді. Ионды-плазмалық қозғалтқыштардың қазіргі таңда белгілі «классикалық» үлгілерінде плазма отыны ретінде ксенон, криптон типті ауыр газдар қолданылады. Ал

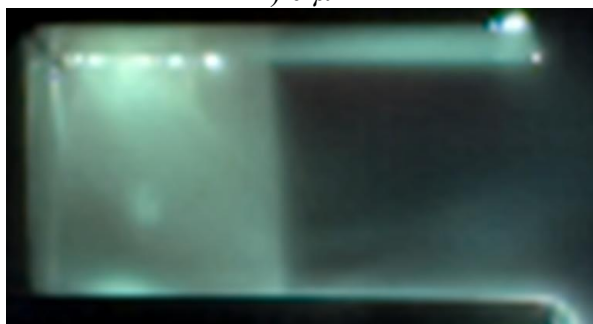
біздің жағдайда, плазмалық отын ретінде электрлік қысқа тұйықталу болғандағы үлкен ток түші әсерінен өткізгіш дененің эрозиялануы кезіндегі заттың ұсақ бөлшектері қолданылады. Сонымен, әртүрлі уақыт моменттеріндегі электрлік ұшқынның пайда болу процесі 2 суретте көрсетілген.



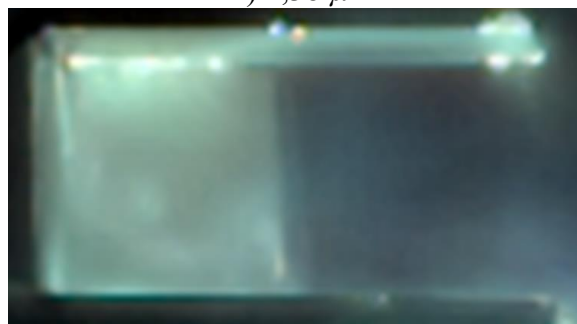
а) 0  $\mu\text{s}$



ә) 2,38  $\mu\text{s}$



б) 4,76  $\mu\text{s}$



в) 7,14  $\mu\text{s}$

**2-сурет.** Электрлік ұшқынның пайда болу процесстері.

Тік бағыттағы электродтар арақашықтығы 28 мм.

Электродтардың контура 2а суретінде ақ түсті түзу сызықтармен көрсетілген, қалғандары осы масштабқа сай.

Жоғарыдағы 2а суретінен байқап отырғанымыздай алғашқы уақыт моментінде жоғарғы сол жақ бұрышта қысқа тұйықталатын электродтар орналасқан жерде олардың тұйықталуынан электрлік ұшқын пайда болады. Осы фотосурет дәлел болғандай, ұшқын жан-жаққа шашырайтын жеке-дара ірі зат бөлшектерінен емес, ұшқын типті газдық разрядтан тұратынын көреміз. Ол, алғашқы уақыт моментінен бастап газдық разрядтың пайда болуы, электрондық көшкіннің дамуына қажет жеткілікті электрондар санымен және негізгі плазма ағынының жеңіл қалыптасуына үлес қосатын көп мөлшерде атомдармен, молекулалармен, сонымен қатар макро бөлшектермен қамтамасыз етіп отыр. 2ә

суретінен негізгі плазмалық ағынның пайда болып, әрі қарай, келесі уақыт моментерінде 2б және 2в суреттерінде көрсетілгендей оның дамитынын көреміз. Плазмалық қозғалтқыштағы тартушы күшті тудыратын осы ионды-плазмалыағын. Сонымен қатар 2а-2в суреттерінен плазмалық ағын пайда болғаннан кейін және оның үдей қозғалыс жасаған кездерінің өзінде тұтандырушы ұшқын газдық разрядтың қосымша зарядтармен және бөлшектермен қамтамасыз етіп отыратынын көреміз (үстіңгі электродтың жоғарға сол жақ бұрышына жақын орналасқан жердегі ақшыл түсті жарық дақтар).

Енді негізгі ионды-плазмалық ағынның үдеу процесін қарастырайық. Ионды

плазмалық ағын екі электродтың аралығында негізгі тізбек бөлігін жалғаушы ток каналы ретінде пайда болады.

Осылайша өздік магнит өрісі тудыратын Лоренц күші әсерінен үдейді:

$$\mathbf{F} = \mathbf{j} \odot \mathbf{B}, \quad (1)$$

бұл магниттік қысымға эквивалент:

$$P = \frac{B^2}{2\mu_0} \quad (2)$$

мұндағы  $j$  – ток тығыздығы;  $B$  – магнит өрісінің кернеулігі;  $\mu_0$  – магниттік өтімділік.

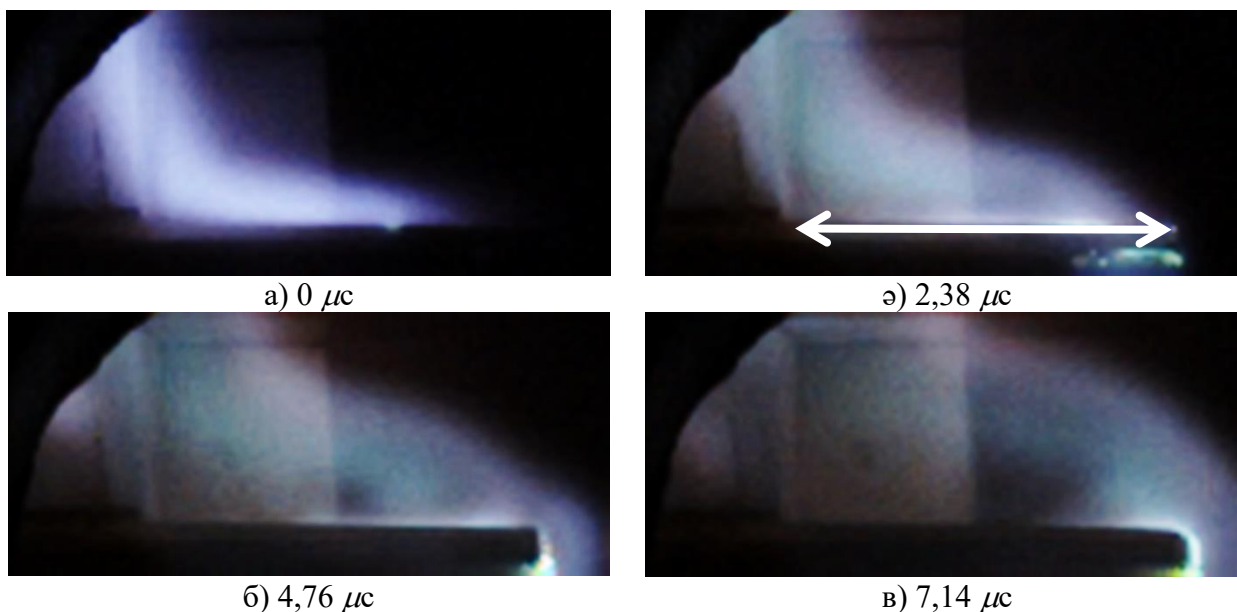
Ионды-плазмалы ток каналының үдеу процесі 3 суретте көрсетілген.

3 суретте көрсетілген мәліметтерге сай ионды-плазмалы ағынның орташа жылдамдығы,  $v_{\text{орт}} = 4,5$  км/с болды. Бұл салыстырмалы түрде үлкен жылдамдық емес әрине. Дегенмен алғашқы эксперименттер үшін тамаша нәтиже болып саналады.

Сонымен қатар плазмалық ток каналының үзілуі кезінде мыс электродтардың күшті эрозияға ұшырайтындағы байқалды. Ол униполярлық доғалы разрядтың пайда болуымен байланысты деген тұжырым жасадық

Электрод эрозиясы кезінде мас макробөлшектерінің жоғары жылдамдықпен электрод аралық кеңістікте жан жаққа шашырауы 4 суретте көрсетілген.

4 суретте көрсетілген мәліметтерге сай электрод эрозиясы кезіндегі мыс макробөлшектерінің шашырауының орташа жылдамдығы,  $v_{\text{б.орт}} = 105$  м/с болды. Жалпы униполяр доғаның пайда болуы плазмалық ағынның үдеуіне кері әсерін тигізеді.



**3-сурет.** Ионды-плазмалы ток каналының үдеу процесі.

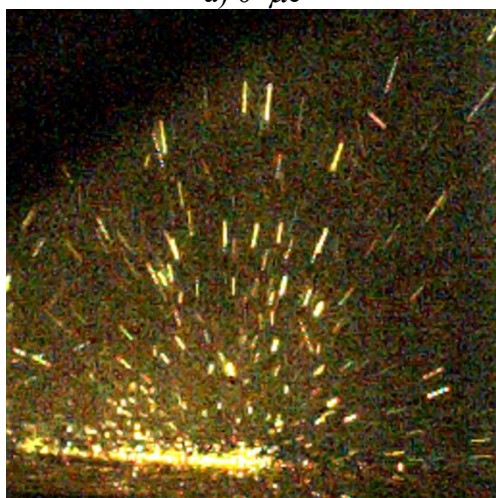
3ә суретіндегі ақ түсті сызық ұзындығы 50 мм, қалғандары осы масштабқа сай.



а) 0  $\mu$ s



ә) 25,6  $\mu$ s



б) 51,2  $\mu$ s



в) 102,4  $\mu$ s

**4-сурет.** Униполяр доға әсерінен электрод эрозиясы кезіндегі мыс макробөлшектерінің жоғары жылдамдықпен электрод аралық кеңістікте шан жаққа шашырауы. Суреттердің тік бағыттағы өлшемі 20 мм.

### Қорытынды

Ионды-плазмалы үдеткіштің моделі жобаланып дайындалды және оның жұмыс істеу принципі зерттелді. Тұтандырушы электрод тудыратын электрлік ұшқын, ұшқын разряд түрінде пайда болатыны анықталды. Демек, тұтандырушы электродты қатты отын ретінде қолдану әбден мүмкін болады. Осылайша ұшқын разряд негізінде пайда болған негізгі ионды-плазмалы ағынның үдей қозғалатындығы және оның орташа жылдамдығы анықталды. Сонымен қатар, ионды-плазмалы ток каналының үзілуі кезінде пайда болған униполяр доға әсерінен жоғары вольтты электродтың күшті эрозияға ұшырайтыны экспериментте байқалды.

### Алғыс

Ғылыми зерттеу жұмысы ҚР БҒМ қолдауындағы IRN AP08053373 гранты аясында жүзеге асырылды.

### Әдебиеттер тізімі

1. I. Levchenko et al. Space micropropulsion systems for Cubesats and small satellites: From proximate targets to furthestmost frontiers // Appl. Phys. Rev. Vol.5. P.011104(36pp) (2018).
2. M. Keidar, T. Zhuang, A. Shashurin, G. Teel, D. Chiu, J. Lukas, S. Haque and L. Brieda. Electric propulsion for small satellites // Plasma Phys. Control. Fusion. Vol.57. P.014005(10pp) (2015).
3. N.N. Antropov, A.V. Bogatyuy, G.A. Dyakonov, N.V. Lyubinskaya, G.A. Popov, S.A. Semenikhin, V.K. Tyutin,



4. M.M. Khrustalev, and V.N. Yakovlev. A New Stage in the Development of Ablative Pulsed Plasma Thrusters at the RIAME // Solar System Research. Vol.46. No.7 P. 531–541 (2012).
  5. A. Szelecka, J. Kurzyna, D. Daniłko, S. Barral. Liquid micro pulsed plasma thruster // Nukleonika. Vol.60(2). P.257-261 (2015).
  6. K. Miyagi, A. Kakami, and T. Tachibana. Characterization of a Liquid-propellant Pulsed Plasma Using Various Nozzle Configurations // Trans. Japan Soc. Aero. Space Sci. Vol.62. No.4. P.184–191 (2019)
  7. S. Barral, J. Kurzyna et al. First experimental characterization of a pulsed plasma thruster with non-volatile liquid propellant // In Proceedings of Space Propulsion Conference. Cologne, Germany (2014).
  8. D. Krejci, B. Seifert, C. Scharleman. Endurance testing of pulsed plasma thruster for nanosatellites // Acta Astronomica. Vol.91. P.187-193 (2013).
  9. T. Huang, Z. Wu, X. Liu, K. Xie, N. Wang, Y. Cheng. Modeling of gas ionization and plasma flow in ablatively pulsed plasma thrusters // Acta Astronaut. Vol.129. P.309-315 (2016).
  10. A. Rezaeiha, T. Schönherr. Overview of alternative propellants for use in PPT // In 29th International Symposium on Space Technology and Science ISTS. Nagoya, Japan (2013).
  11. R.L. Burton, P.J. Turchi. Pulsed plasma thruster // Journal of propulsion and power. Vol.14. No.5 (1998).
- J. Mueller. Thruster Options for Microspacecraft: A Review and Evaluation of State of the Art and Emerging Technologies // Micropropulsion for Small Spacecraft. Progress

18.10.2020 басылымға қабылданды

М.Қ. Досболаев , Е.А. Үсенов 

Қолданбалы ғылымдар және ақпараттық технологиялар институты,  
Алматық.-сы, Қазақстан  
e-mail: [merlan@physics.kz](mailto:merlan@physics.kz)

## ҚАТТЫ ОТЫНДЫ ИОНДЫ-ПЛАЗМАЛЫ ҚОЗҒАЛТҚЫШТЫҢ МОДЕЛІ ЖӘНЕ ОНЫҢ ЖҰМЫС ІСТЕУ ПРИНЦИПІН ЗЕРТТЕУ

**Аңдатпа.** Қарастырылып отырған жұмыста қатты отынды ионды-плазмалы қозғалтқыштың моделі және оның жұмыс істеу принципі туралы мәліметтер келтірілген. Қатты отынмен жұмыс істейтін ионды-плазмалы қозғалтқыштың электродтар жүйесінің жаңа моделі дайындалды. Ол екі бөліктен тұрады: плазма ағыны үдетілетін жоғары вольтты электродтар, рельсотрон принципіне негізделіп жұмыс істейді, ал жоғары амперлі тұтандырушы электрод, плазма тудырушы қызметін атқарады. Тұтандырушы электродтың жерге жалғанған электродпен жанасуы механикалық әсер арқылы жүзеге асырылады. Алғашқы эксперименттерде тұтандырушы электрод ретінде графит пластинасы қолданылды. Осылайша тұтандырушы электрод тудыратын электрлік ұшқын, ұшқын разряд түрінде пайда болатыны анықталды. Бұл тұтандырушы электродты қатты отын ретінде қолдануға болатындығын көрсетеді. Тұтандырушы электродтың электрлік қысқа тұйықталуы кезінде пайда болатын ұшқын разряд негізгі ионды-плазмалы ағынды тудырады. Ол өз кезегінде өздік магнит өрісі тудыратын магниттік қысым әсерінен үдеп, жоғары жылдамдыққа ие болады. Экспериментте анықталған ионды-плазмалы ағынның орташа жылдамдығы 4,5 км/с тең болды. Бұл шектік мән емес әрине. Сонымен қатар, эксперименттер барысында ионды-плазмалы ток каналының үзілуін униполяр доғалы разряд тудыратыны, және оның салдарынан жоғары вольтты электрод беті күшті эрозияға ұшырайтындығы белгілі болды.

**Түйін сөздер:** Ұшқын разряд, рельсотрон, плазмалық ағын, униполяр доғалы разряд, плазманың үдеуі.

М.К. Досболаев , Е.А. Усенов 

Институт прикладных наук и информационных технологий, г. Алматы, Казахстан

e-mail: [merlan@physics.kz](mailto:merlan@physics.kz)

## МОДЕЛЬ ИОННО-ПЛАЗМЕННОГО ДВИГАТЕЛЯ НА ТВЕРДОМ ТОПЛИВЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИНЦИПА РАБОТЫ ДВИГАТЕЛЯ

**Аннотация.** В рассматриваемой работе приведены результаты экспериментального исследования модели ионно-плазменного двигателя на твердом топливе и рассмотрен принцип его работы. Разработана новая модель системы электродов ионно-плазменного двигателя, работающего на твердом топливе. Она состоит из двух частей: высоковольтные электроды для ускорения потока плазмы, работает на основе принципа рельсотрона, а высокоточный поджигающий электрод, выполняет функцию генерации плазмы. Поджигающий электрод контактирует с заземленным электродом под механическим воздействием. В экспериментах в качестве поджигающего электрода была использована графитовая пластина. В ходе экспериментов выявлено, что искра поджигающего электрода образуется в виде искрового разряда. Это показывает, что поджигающий электрод может использоваться в качестве твердого топлива. Искровой разряд, возникающий при электрическом коротком замыкании поджигающего электрода, вызывает основной ионно-плазменный поток. Он, в свою очередь, приобретает высокую скорость ускоряясь под воздействием магнитного давления, вызываемого собственным магнитным полем. Средняя скорость ионно-плазменного потока, определенная в эксперименте, была равна 4,5 км/с. Данное значение не является максимальным и всегда есть возможность для дальнейшего увеличения. Кроме того, в ходе экспериментов стало известно, что разрыв канала ионно-плазменного тока вызывает униполярную дугу, вследствие чего высоковольтная электродная поверхность подвергается сильной эрозии.

**Ключевые слова:** Искровой разряд, рельсотрон, плазменный поток, униполярный дуговой разряд, ускорение плазмы.

М.К. Dosbolayev , Y.A. Ussenov 

Institute of Applied Sciences and Information Technology, Almaty, Kazakhstan

e-mail: [merlan@physics.kz](mailto:merlan@physics.kz)

## MODEL OF ION-PLASMA ENGINE ON SOLID PROPELLANT AND RESEARCH OF THE ENGINE OPERATION PRINCIPLE

**Abstract.** This work presents model of a solid-fuel ion-plasma thruster and its principle of operation. For solid-fuel ion-plasma thruster a new model of the electrode system was made. It consists of two parts: high-voltage electrodes operating on the principle of “railguns” and providing plasma acceleration, high-ampere ignition electrode, providing plasma ignition. The ignition electrode is in contact with an grounded electrode under mechanical influence. A graphite plate was used as an ignition electrode in experiments. Also it was revealed that the discharge of igniting electrode is formed in the form of spark discharge. It was revealed that the electrical spark created by the ignition electrode is a spark discharge. This shows that the ignition electrode can be used as a solid fuel. An ion-plasma flow is generated by a spark discharge resulting from a short circuit of the ignition electrode. Due to the magnetic pressure of the internal self-magnetic field, the ion-plasma flow is accelerated with a sufficiently high velocity. The average flow velocity obtained in the experiment is 4.5 km/s. However this is not the limit. It was also revealed that the breakdown of the current channel of the ion-plasma flow contributes to the appearance of a unipolar arc, as a result of which the surface of the high-voltage electrode is strongly eroded.

**Key words:** Spark discharge, “railgun” electrodes, plasma flow, unipolar arc discharge, plasma acceleration.