



Разработка модулей ЭРД на базе ХОЛЛОВСКОГО И ИОННОГО ДВИГАТЕЛЕЙ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ





Эффективность ЭРД

ЭРД – это устройство преобразующее электрическую энергию в кинетическую энергию струи.

$$R[\text{Н}]I_{\text{уд}} \left[\frac{\text{М}}{\text{С}} \right] = 2\eta N_{\text{эл}}[\text{Вт}]$$

$$I_{sp}^{opt} = \sqrt{\frac{2\tau\eta}{\gamma}}$$

$N_{\text{эл}}$ – электрическая мощность

R – тяга

$I_{\text{уд}}$ – удельный импульс тяги

η – полный КПД

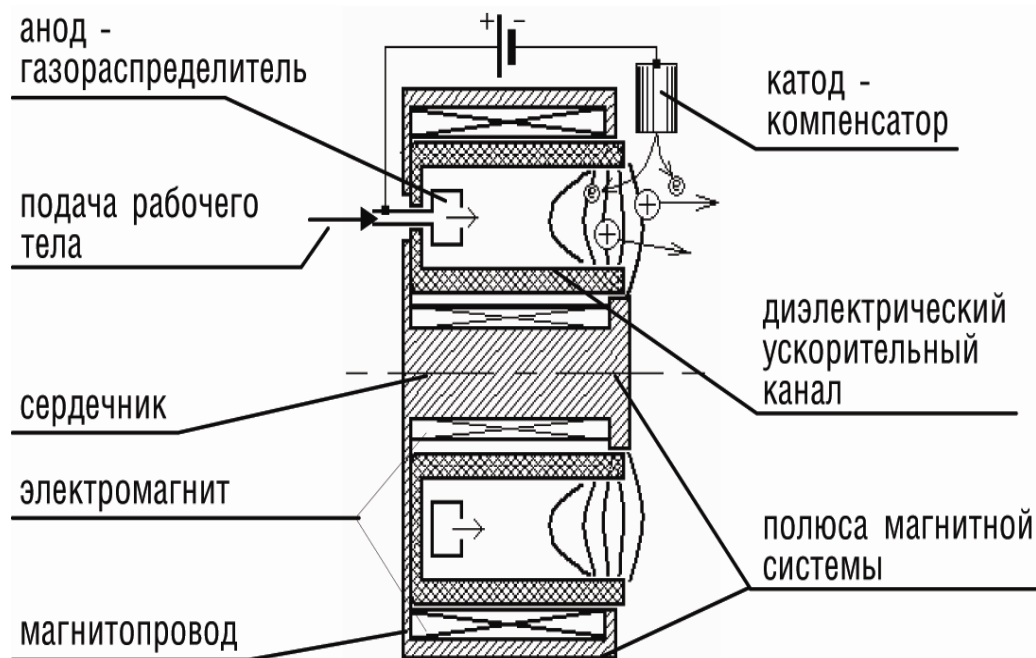
γ – массовое совершенство энергоустановки кг/кВт

τ – время работы двигателя











Холловский двигатель. Принцип действия.





Характерные представители ХД

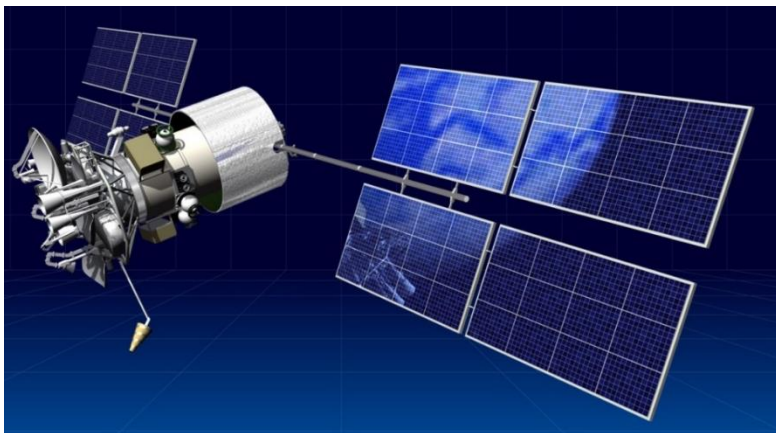
	СПД-50М	СПД-70	СПД-100В	СПД-140	XR-5	КМ-60
Характеристики						
Мощность, Вт	300	669	1350	3000/4500	4500	<930
Тяга, мН	18	39	83	193/290	290	42
Удельный импульс, с	1300	1470	1600	1680/1770	1790	1860
КПД, %	35	43	45	50/55	58	42
Масса, кг	1,3	2,8	3,5	8,8		3,3
Ресурс (прогноз), ч	> 5000	> 3100	> 9000	> 20000	> 20000	> 4000
Количество включений	>6000	3000	5000	> 7000		> 8000





Холловский двигатель КМ-75

ДУ КА массой до 2500-3000 кг



Номинальная тяга, мН	95
Разрядное напряжение, В	810
Разрядный ток, А	2.85
Средний удельный импульс, с	>2680
Полный импульс тяги, кН·с	>1600
Число включений	>4400

- Разработан по заказу АО «ИСС»;
- Стадия разработки – готовность к летным испытаниям;

Lovtsov A.S., Tomilin D.A., Muravlev V.A. Development of High-Voltage Hall Effect Thrusters at Keldysh Research Centre. Presented in the 68th International Astronautical Congress (IAC), 2017, IAC-17.C4.4.4

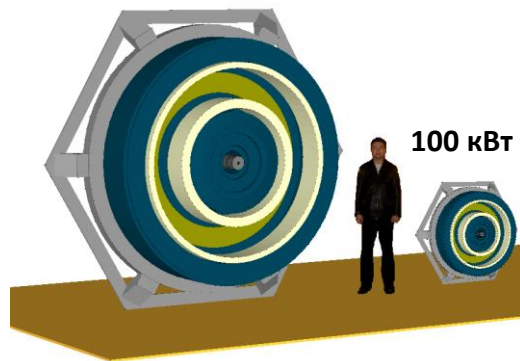




Теория масштабирования холловских двигателей

Полуэмпирическая модель эффективности

1 МВт



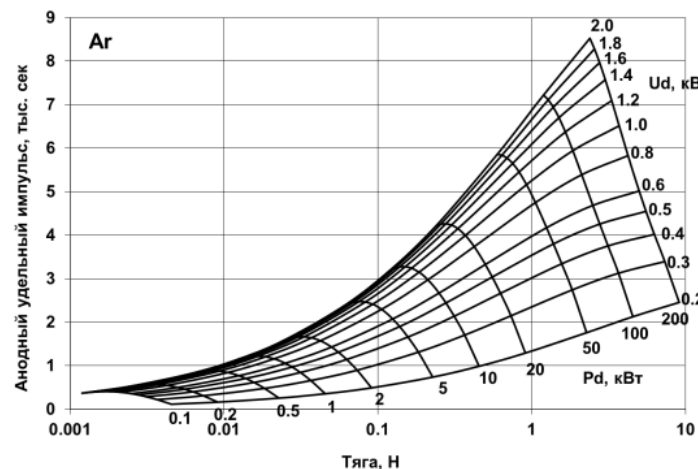
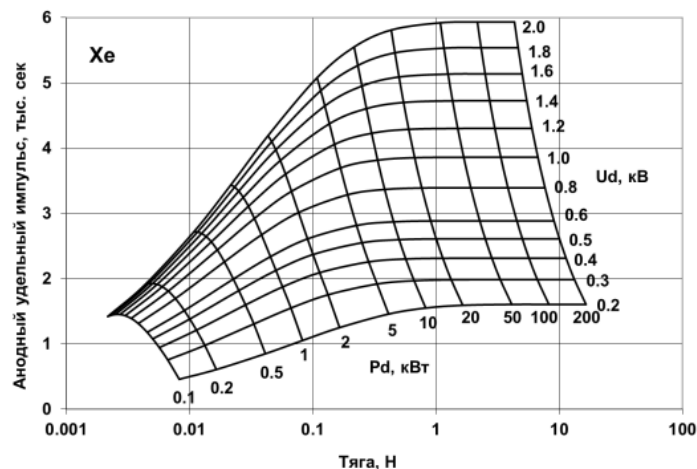
$$\eta_m = 1 - \exp\left[-C_2 \left(M_A \beta_i \sqrt{P_d}\right) / \left(\gamma'_q U_d\right)\right]$$

$$I_{spa} = \gamma_q \eta_m \sqrt{\eta_U} \sqrt{(2eU_d) / (Mg^2)}$$

$$T = \left(\gamma_q / \gamma'_q\right) \eta_I \sqrt{\eta_U} P_d \sqrt{(2M / eU_d)}$$

$$\eta_a = \eta_q \eta_m \eta_I \eta_U$$

Shagayda, A.A. «On Scaling of Hall Effect Thrusters», IEEE Transactions on Plasma Science, Vol. 41, No. 1, P. 12-28, Jan, 2015





ЭРДУ для систем межорбитальной транспортировки



Двигатель холлового типа КМ-10



БУР для двигателя КМ-10

Двигатель, БУР и СПУ готовы в виде опытных образцов.

В 2021 году были подготовлены РКМ для участия в проекте РОСС в части корректирующей ДУ. Начало работ запланировано в 2022 году.



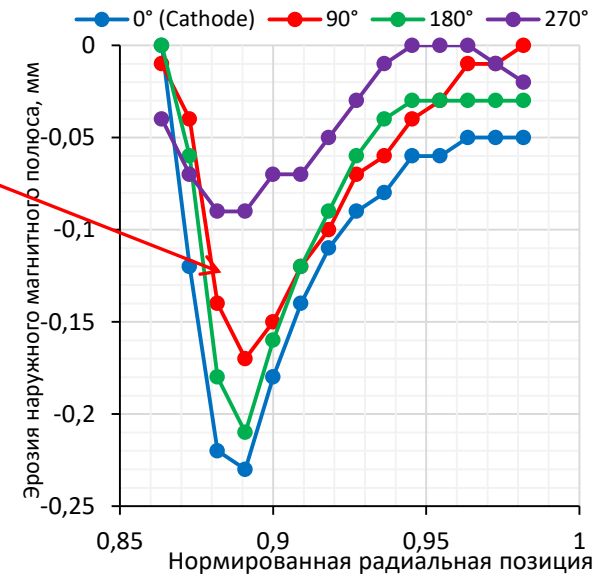
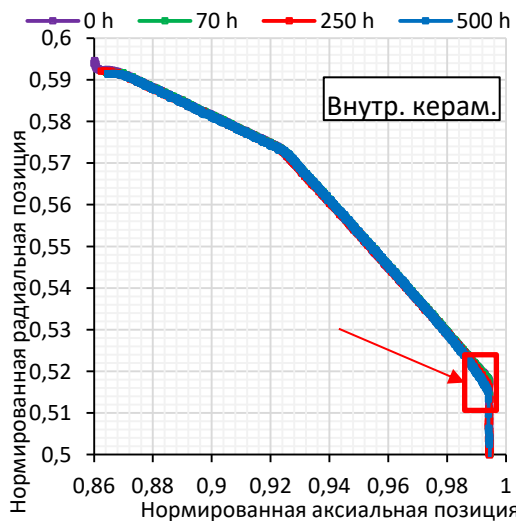
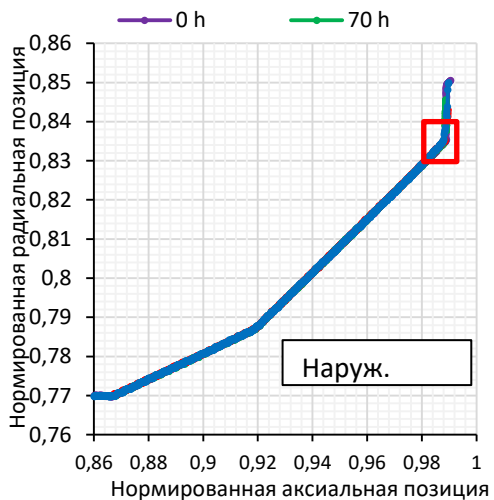
СПУ для двигателя КМ-10
(разработано АО НПЦ «Полюс» из собственных средств в 2021 году)

	Минимальное значение	Максимальное значение	Маршевый режим	Режим коррекции
Тяга, мН	80	590	575	225
Удельный импульс, с	1450	3350	2950	2400
Мощность, кВт	1,5	12,6	12,6	5,4
Напряжение, В	300	900	600	600





Ресурсные испытания КМ-10. Скорость эрозии

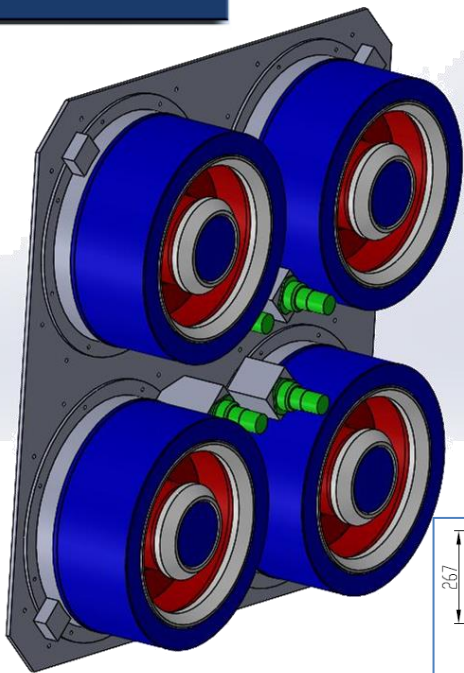


- Максимальная измеренная скорость эрозии стали..... 0.46 мм/кч
- Оценка сверху для скорости эрозии графита0.03 мм/кч

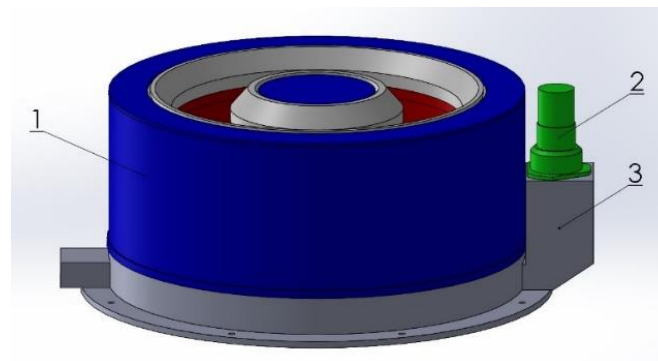
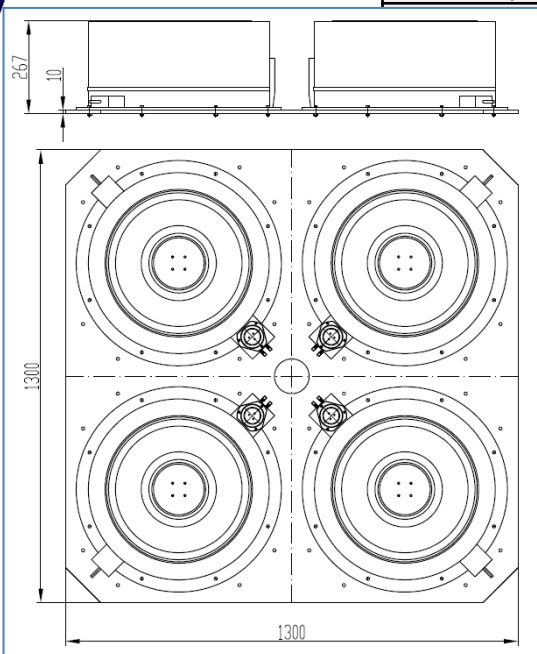




Разработка эскизного проекта на модуль ЭРД на базе холмовского двигателя

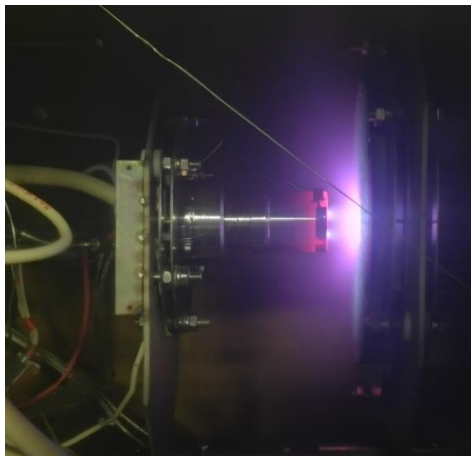


Параметр	Рабочее тело	
	Xe	Kr
Количество двигателей	4	4
Номинальная мощность, кВт	200	200
Максимальная мощность, кВт	250	250
Удельный импульс, км/с	46,8	50,1
Тяга, Н	5,6	5,2
КПД	0,7	0,7
Суммарный расход, мг/с	123	105
Масса (не более), кг	400	400
Габаритные размеры, мм	1300×1300×267	1300×1300×267

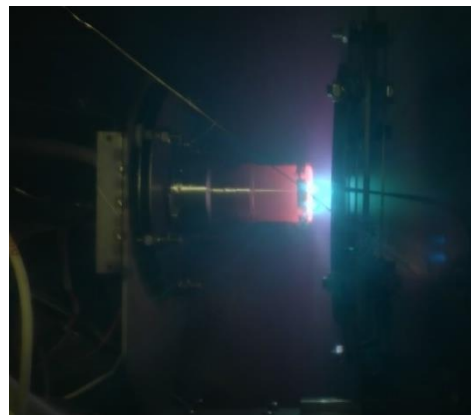




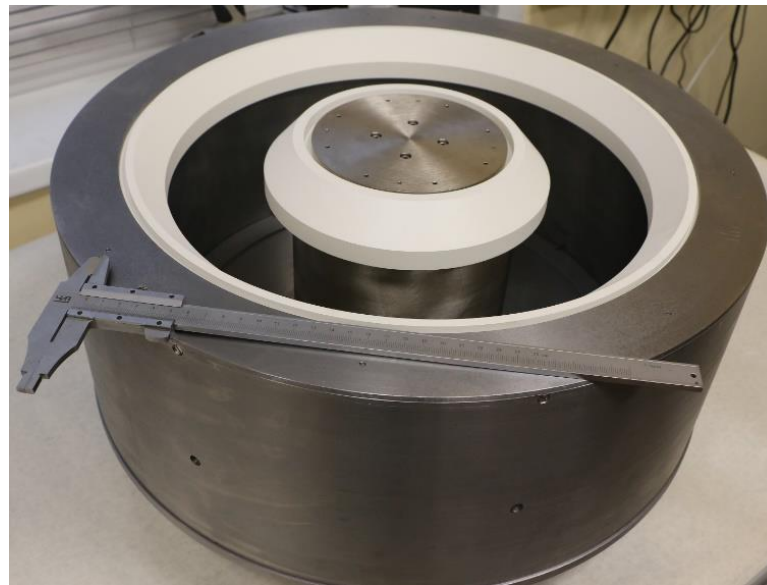
Разработка, изготовление и испытания макетов ключевых элементов модуля ЭРД на базе ХД



Катод, ток разряда 50 А



Катод, ток разряда 75 А



Макет холловского двигателя мощностью до 65 кВт
(потенциально действующий) в сборе

Проведены испытания прототипов мощностью 5-15 кВт при напряжениях разряда до 2 кВ и удельных импульсах до 45 км/с.

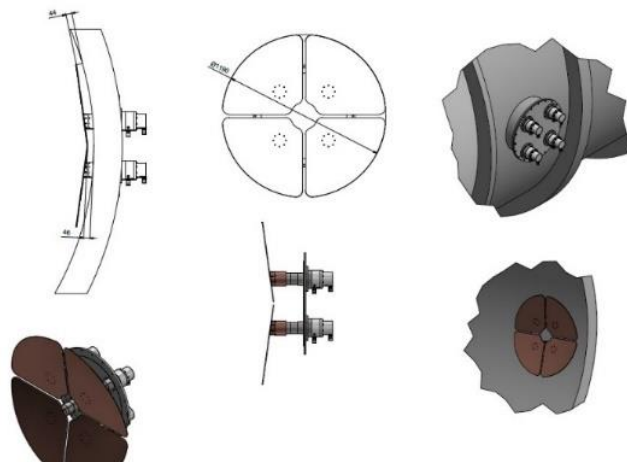
Проведено комплексное сравнение работы ХД ВС в двух конфигурациях РК: с керамическими узлами и с проводящими вставками, разработаны рекомендации по проектированию ХД ВС 50 кВт-ого класса в обеих конфигурациях.



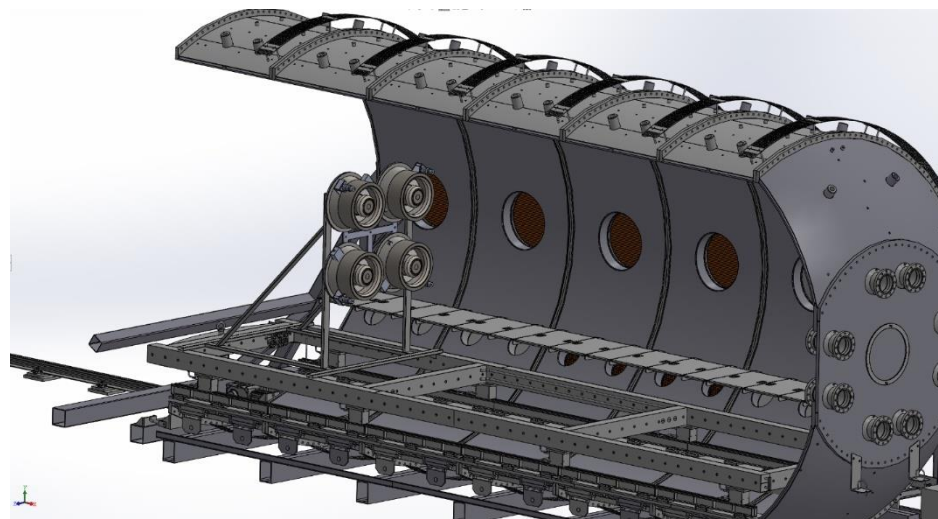


Стендовая база для испытаний ХД

Вид испытаний	Стенды и установки	Необходимость модернизации
Параметрические и ресурсные испытания катодов-нейтрализаторов	Установки УП-2, КВУ-90 (АО ГНЦ «Центр Келдыша»)	Требуется дооснащение источниками питания и фланцем с вакуумными электрическими вводами.
Климатические испытания КМ-50М, катодов	Установка ARS-1100 (АО ГНЦ «Центр Келдыша»)	-
Ресурсные испытания катодов-нейтрализаторов	Установки УП-2, КВУ-90 (АО ГНЦ «Центр Келдыша»)	Требуется дооснащение источниками питания и фланцем с вакуумными электрическими вводами.
Механические испытания КМ-50М	Возможно проведение испытаний при кооперации с АО «Корпорация «ВНИИЭМ»	-
Параметрические и ресурсные испытания КМ-50М	Стендовый комплекс БВК-01.00.00.000 (АО ГНЦ «Центр Келдыша»)	Необходимо дооснащение средствами криогенной откачки; системой электропитания; системой измерения и обработки данных; системой автоматизированного управления; ТИУ; приемником мощности
Термоциклические испытания КМ-50М	Установка ВК-1000. (АО ГНЦ «Центр Келдыша»)	Необходима дооснащение подъёмным оборудованием. Необходима разработка спец. оснастки



Криогенный насос с внешними криопанелями



Модуль ЭРД на базе КМ-50М в БВК





Результаты 2021 года

1. Разработан эскизный проект на модуль ЭРД максимальной мощностью 250 кВт включающий четыре холловских двигателя КМ-50М номинальной мощностью 50 кВт и максимальной мощностью 65 кВт. Тяга модуля до 5,6 Н при работе на ксеноне и до 5,2 Н при работе на криптоне со скоростью истечения струи свыше 45 и 50 км/с соответственно.
2. Разработаны, изготовлены и испытаны макеты ключевых элементов модуля ЭРД на базе ХД

Планы работ

2022 – КД на модуль ЭРД на базе ХД;

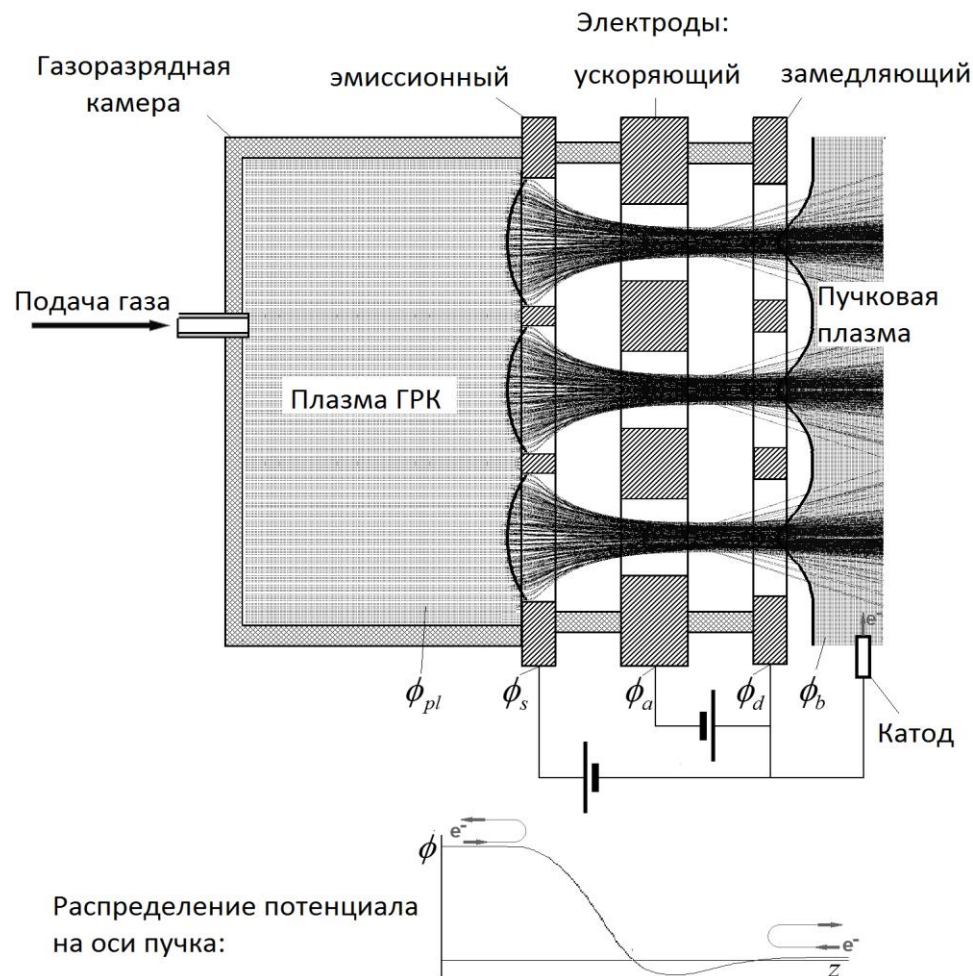
2023 – окончание подготовки стендовой базы и изготовление ДСЕ модуля;

2024 – изготовление модуля и начало испытаний.




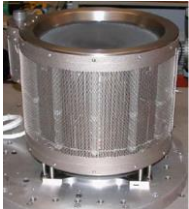
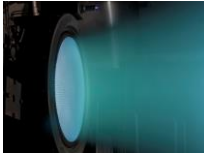

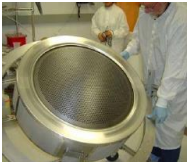



Схема ионного двигателя





Характерные представители ИД

	XIPS-25	T-6	NEXT	ИД-200КР	NEXIS	ИД-500
Характеристики						
Мощность, кВт	2,1/4,2	4,5	6,83	3,0	20,0	35,0
Тяга, мН	79/165	142	237	85	445	750
Удельный импульс, с	3400/3500	3470	4200	4500	6850	7000
КПД, %	64	55	73	64	75	75
Ресурс (прогноз), ч	> 15000	> 6000	> 50000	> 10000	> 100000	> 10000





БК на базе ионного двигателя ИД-200КР

ДУ КА для ГСО массой до 2500-3000 кг



	ИД-200КР	КМ-75	СПД-100ВМ
Номинальная тяга, мН	85	95	92
Разрядное напряжение, В	2000	810	300
Мощность, кВт	3,0	2,35	1,35
Средний удельный импульс, с	>4500	>2680	>1700
КПД, %	64	54	52
Полный импульс тяги, кН·с	>2000	>1600	>4500
Число включений	>8000	>4400	>5000
Масса РТ для выработки 1600 кН·с	36,3	60,5	95,6

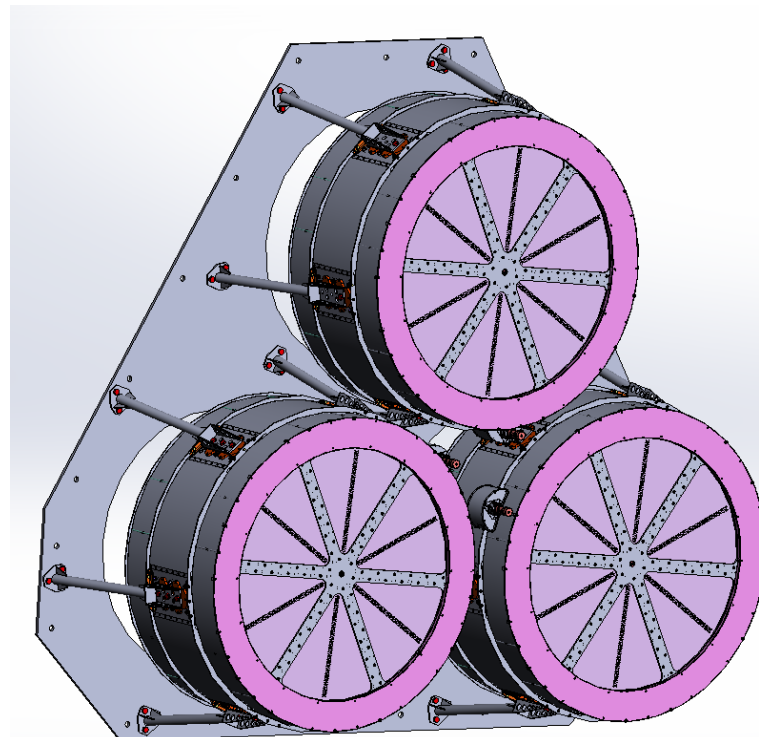




Разработка ЭП на модуль ЭРД на базе ионного двигателя

Модуль ЭРД на базе ИД

	Хе	Kr
Номинальная мощность, кВт	240	240
Максимальная мощность, кВт	250	250
Удельный импульс, м/с	80000	100000
Тяга, Н	4,5	3,6
КПД	0,76	0,74
Масса	330	
Габаритные размеры, мм	2300×2100×715	

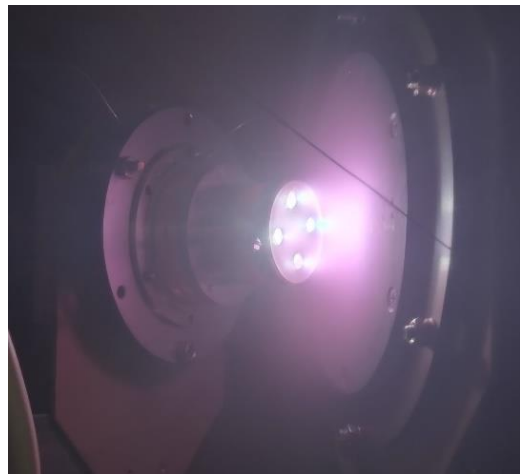


3D-модель модуля ЭРД

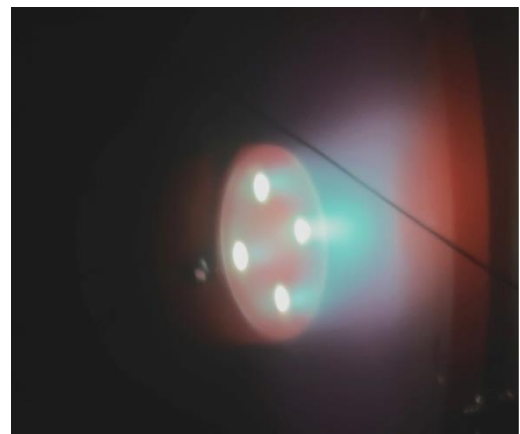




Разработка, изготовление и испытания макетов ключевых элементов модуля ЭРД на базе ИД



Катод ГРК, ток разряда 70 А



Катод ГРК, ток разряда 150 А



Макет ионного двигателя мощностью до 85 кВт
(потенциально действующий) в сборе





Результаты 2021 года

1. Разработан эскизный проект на модуль ЭРД максимальной мощностью 250 кВт включающий три ионных двигателя ИД-750 номинальной мощностью 80 кВт и максимальной мощностью 100 кВт. Тяга модуля до 4,5 Н при работе на ксеноне и до 3,6 Н при работе на криптоне со скоростью истечения струи 80 и 100 км/с соответственно.
2. Разработаны, изготовлены и испытаны макеты ключевых элементов модуля ЭРД на базе ИД.

Планы работ

2022 – КД на модуль ЭРД на базе ИД;

2023 – окончание подготовки стендовой базы и изготовление ДСЕ модуля;

2024 – изготовление модуля и начало испытаний.

