

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗРАБОТКИ МОЩНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ КОСМИЧЕСКИХ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Жильцов В.А., КулыгинВ.М.

Москва 2019



«Земля — колыбель человечества, но нельзя вечно оставаться в колыбели»
К. Э. Циолковский

$$V_x = V_{ucm} \cdot ln \frac{M_к + M_{ucm}}{M_к}$$

«Может быть, с помощью электричества можно будет со временем придавать громадную скорость выбрасываемым из реактивного прибора частицам».

Основные характеристики ракетных двигателей

$$F = V_{eff} \times \dot{M}$$ *Тяга, Н*

где

$\dot{M} \equiv \frac{dM}{dt}$ *- Расход массы, кг/с,* V_{eff} *- Эффективная скорость истечения, м/с*

$$I_m = \frac{F}{\dot{M}} = V_{eff}$$ *- импульс или удельная тяга, м/с*

$$P = F \cdot V_{eff}$$ *Мощность тяги*

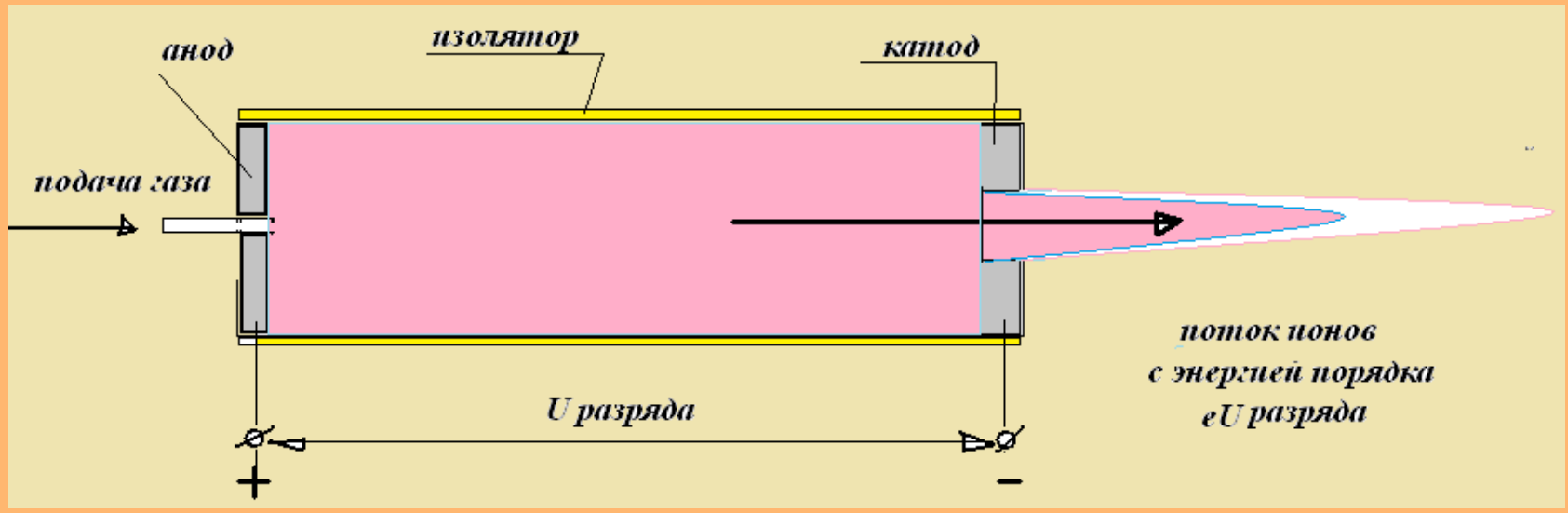
$$I = \frac{I_m}{g}$$ *- Удельный импульс, с*

$$\alpha = M/P$$



Полная масса:	5950 кг
Сухая масса:	5 480 кг
Тяга:	
Вакуум:	423,4 тс
Уровень моря:	390,2 тс
Удельный импульс:	
Вакуум:	337,8 с
Уровень моря:	311,3 с
Время работы:	270 с
Расход массы	1.3 т/с
Мощность	12 МВт
Высота:	3 600 мм
Диаметр:	3 200 мм

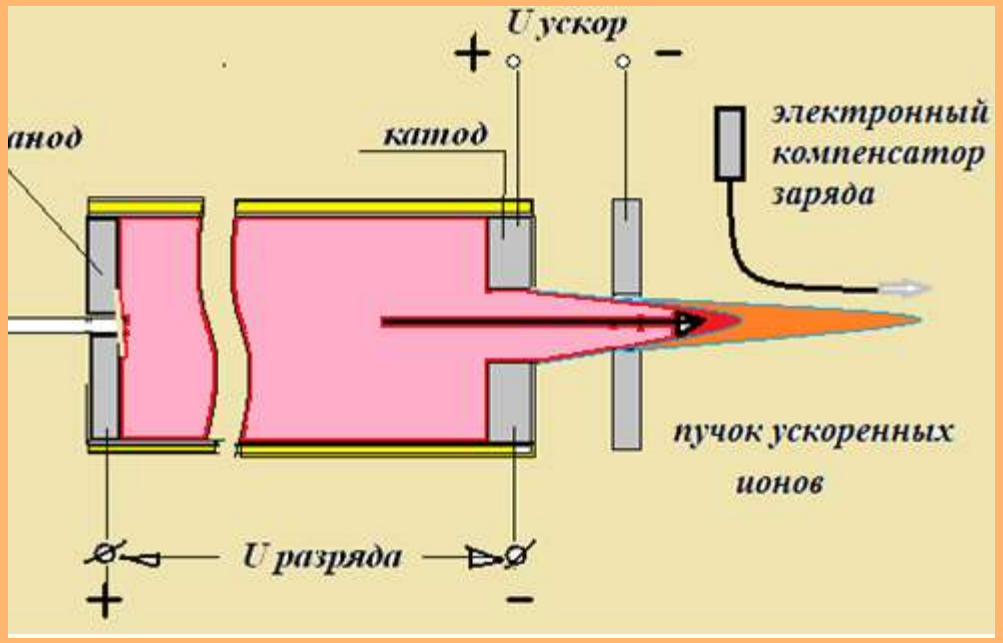
Простейшая схема электроразрядного двигателя

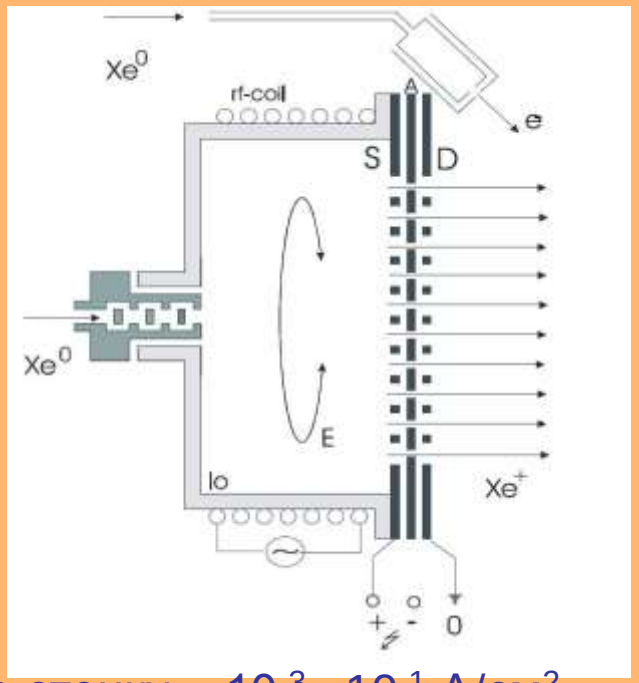


При такой конфигурации энергия вытекающих ионов определяется падением напряжения на разряде и составит величину ~ 10 –100 эВ.

(в «химическом» РД ~ 0,3 –0.5 эВ)

Ионные Ракетные Двигатели, ИРД.





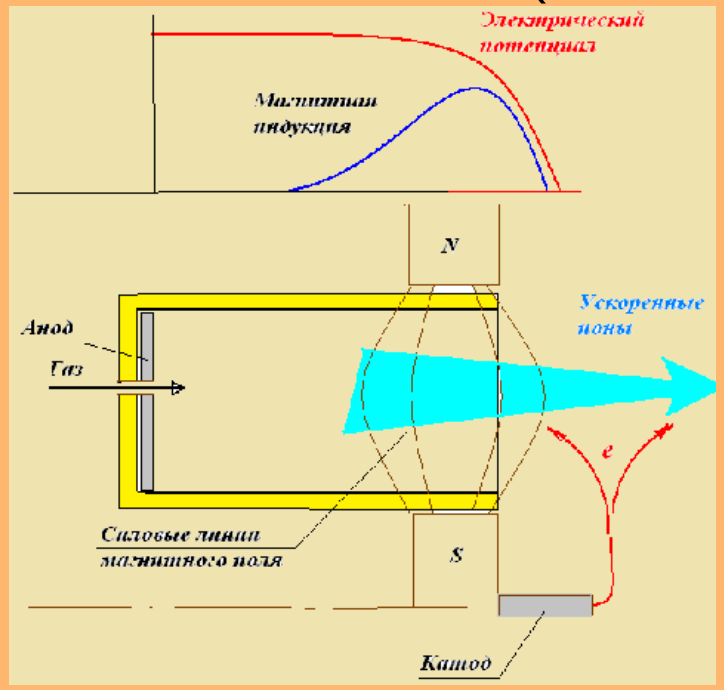
- Плотности тока ионов на перфорированную стенку ~ 10^{-3} - 10^{-1} А/см^2
- Удельный импульс – отношение скорости истечения к ускорению силы тяжести-10^3 – 10^5 с (выше – падает плотность тяги и надежность)
- Тяга на 1 м^2 апертуры ~ 1 – 10 Н/м^2
- Энергия ионов обычно 10^3 – 10^4 эВ.

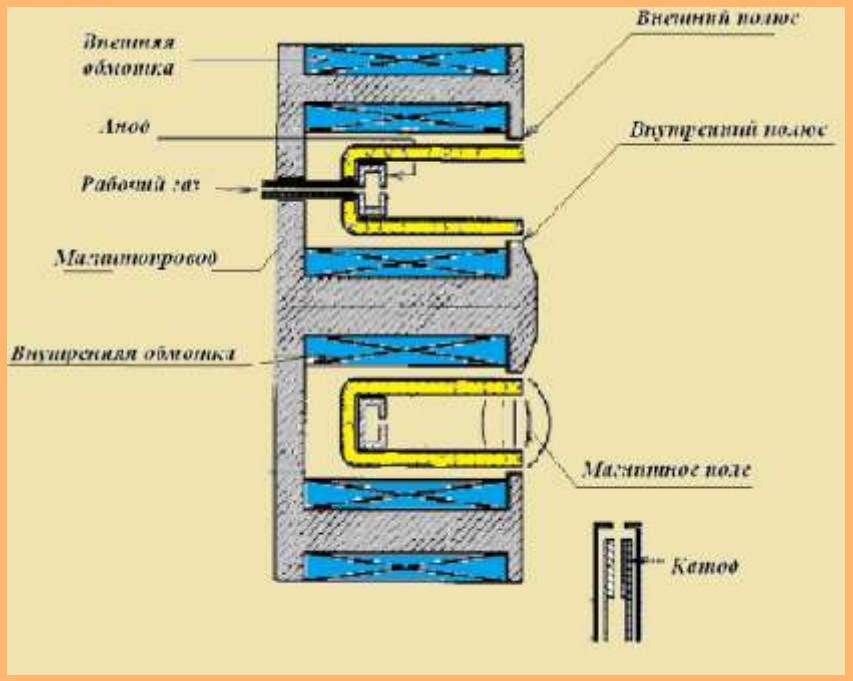
Ионный двигатель ИД500 разработки Исследовательского центра имени М.В.Келдыша.



Удельный импульс, с. 7000. Тяга, 725 мН. . Мощность, кВт. 35 ...

Стационарные плазменные двигатели СПД (Холловские, Морозова)





- Энергия ионов обычно (3 – 6) x 10^2 до 10^3 эВ
- Плотности тока ионов на выходе ~ 10^{-2} А/см
- Удельный импульс ~ 10^3 с
- Тяга на 1 $м^2$ апертуры до 10 Н/$м^2$



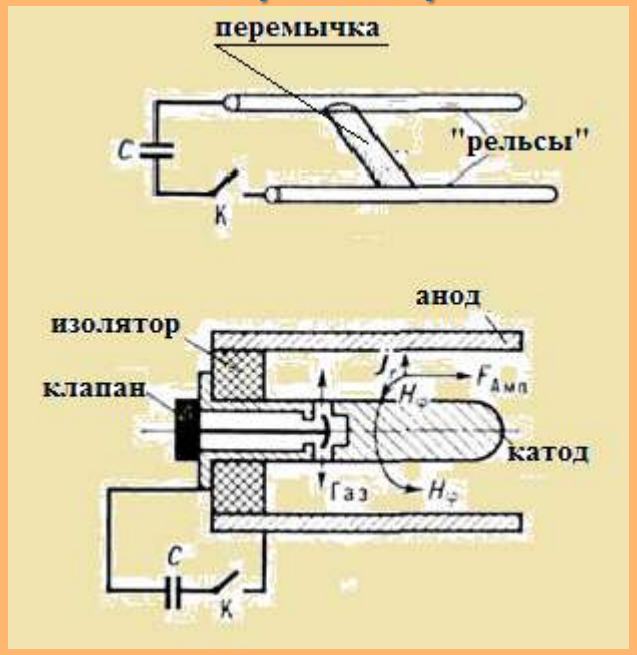


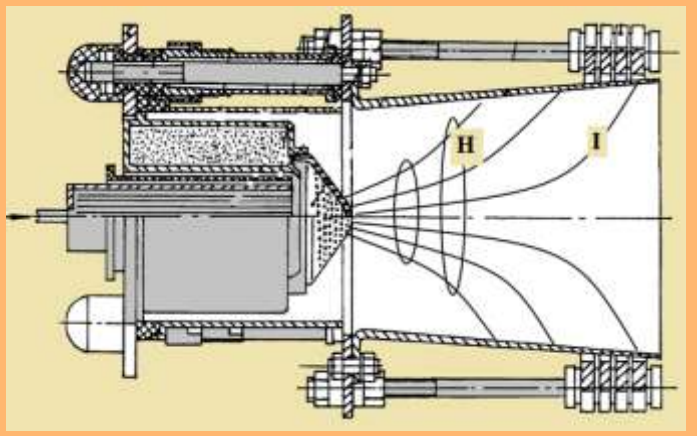


Линейка двигателей СПД разработки ОКБ «Факел» (г.Калининград) .
Слева направо: СПД70, СПД100, СПД200
(индекс означает диаметр выходного канала в миллиметрах).

МагнитоПлазмоДинамический двигатель

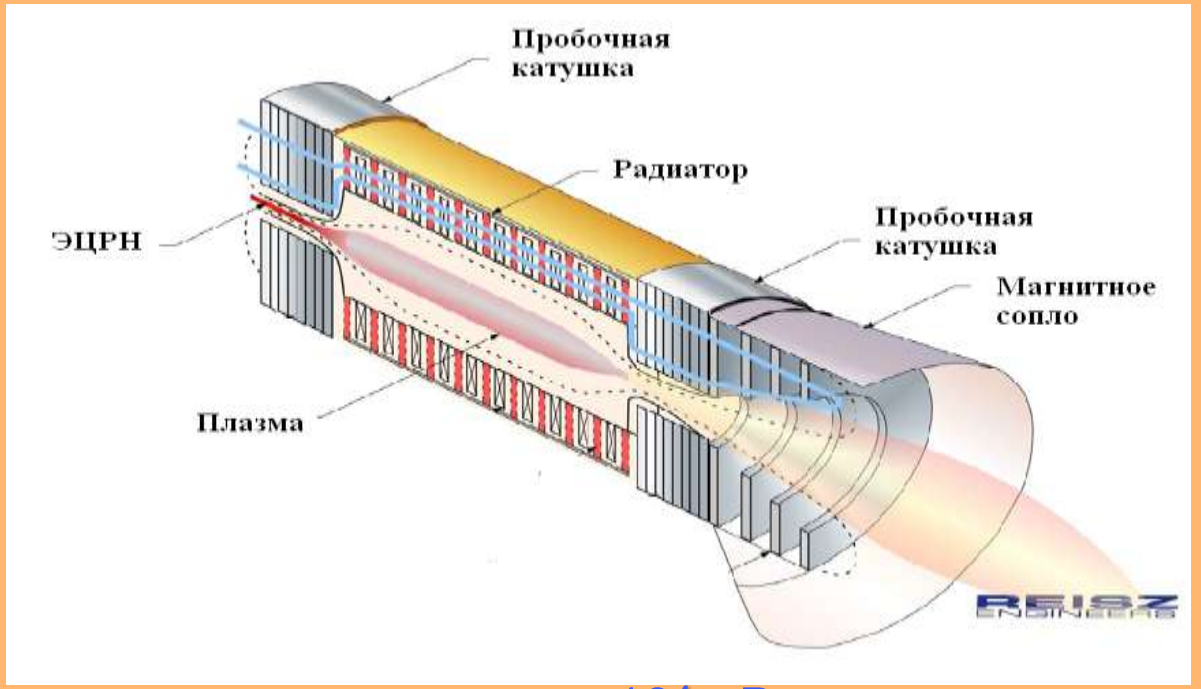
Схема «рельсотрона»





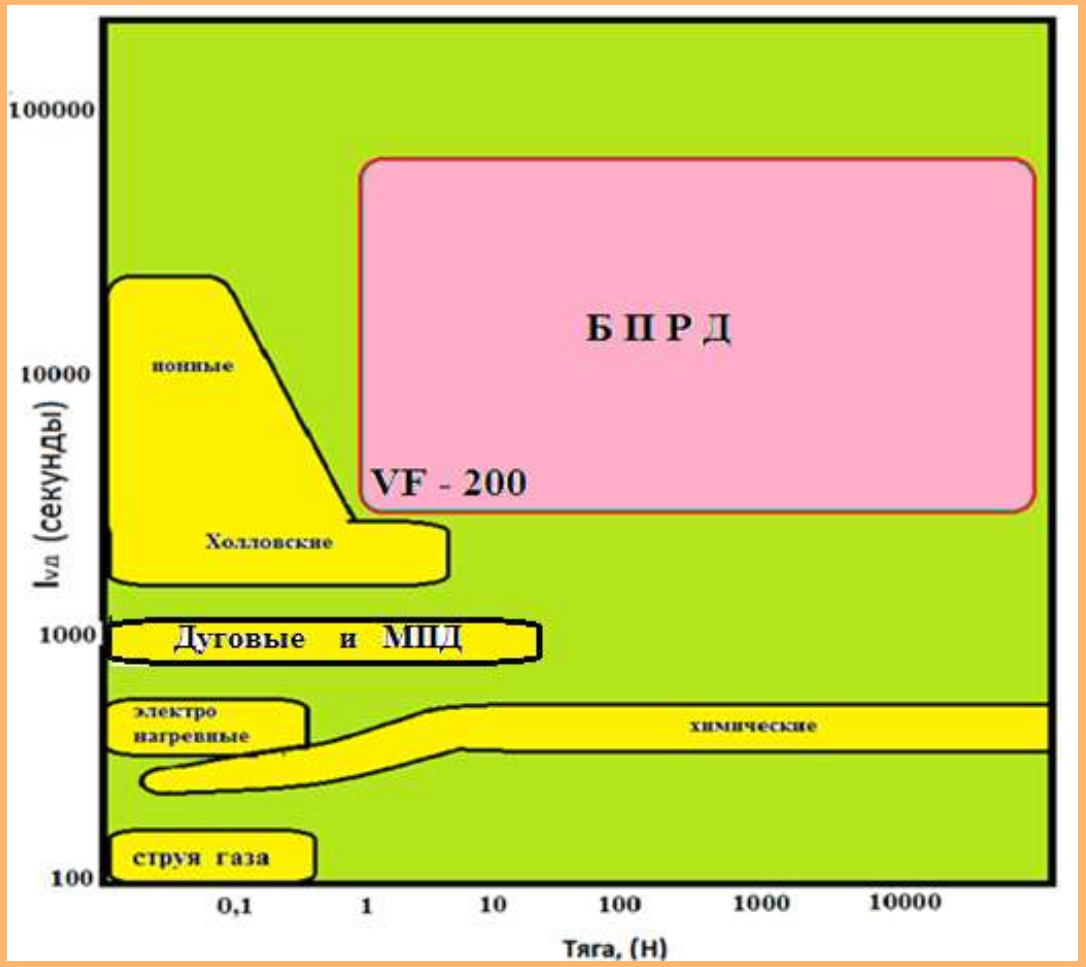
- Энергия ионов до 100 эВ
- Плотности тока ионов на срезе сопла до 10 А/см^2
- Удельный импульс ~ 10^3 с
- Тяга на 1 м^2 апертуры ~ 10^2 Н/м^2

Неизотермические (амбиполярные) БПРД



- Энергия ионов до 10^4 эВ
- Плотности тока ионов на выходе до 10 А/см^2
- Удельный импульс $10^3 – 10^4$ с
- Тяга на 1 м^2 апертуры ~ $10^2 – 10^3$ Н/м^2

Плазменный двигатель с нагревом ионов ВЧ излучением на частоте ионного циклотронного резонанса



Достоинства

Возможность варьирования удельного импульса и тяги в широких пределах при заданной мощности

Удельная плотность мощности тяги на 2 порядка превышает таковую в существующих плазменных двигателях

Возможность создания модулей в широком диапазоне мощностей

Магнитная термоизоляця конструкций большой ресурс работы.

Резонансный энерговклад - высокая энергетическая эффективность

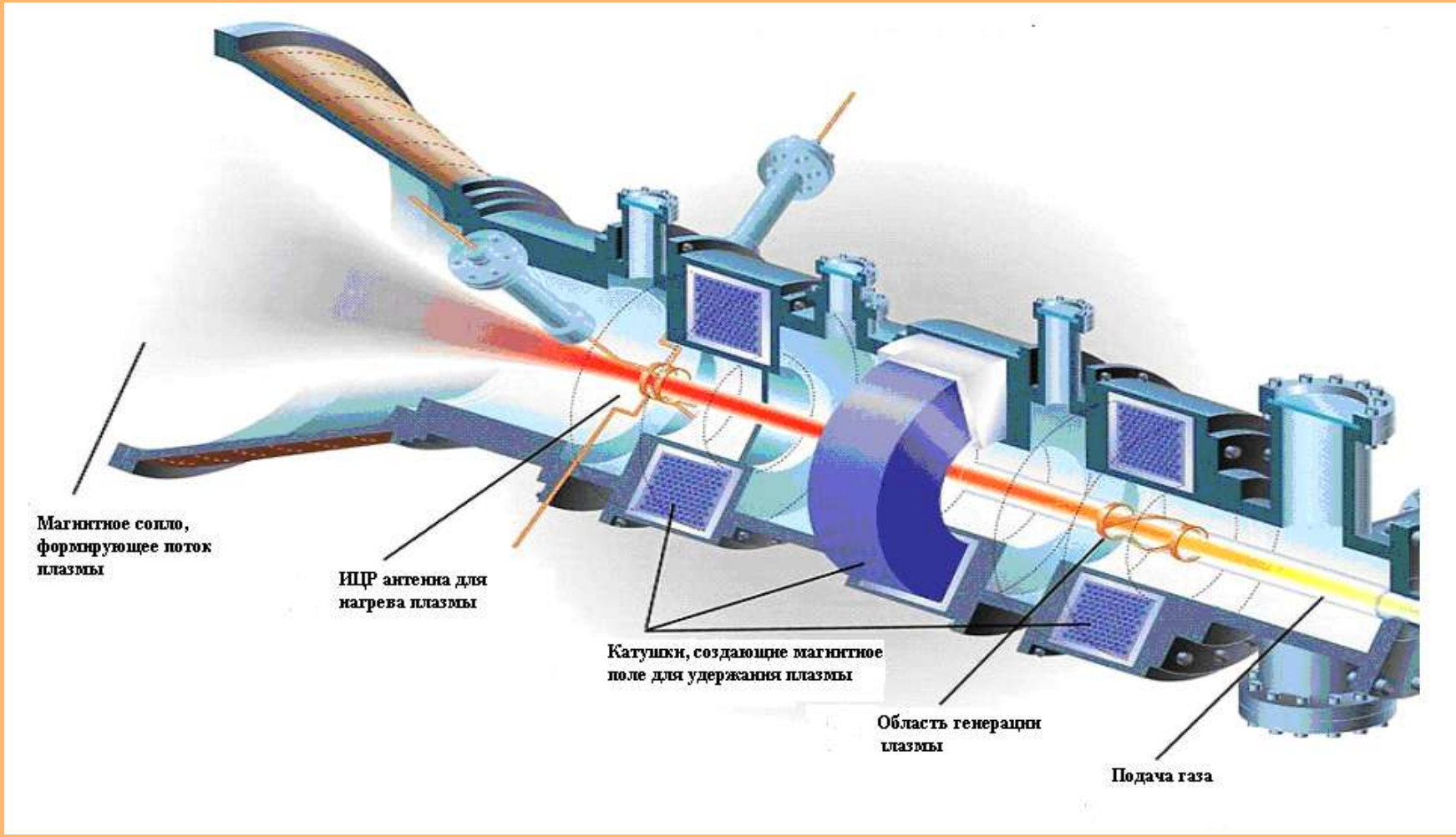
Большой потенциал эволюционного развития без изменения схемы.

Возможность использования в качестве рабочего тела любых элементов.

Магнитная экранировка от корпускулярного облучения.

США, проект VASIMR , эксперимент, 200 кВт

(Variable Specific Impulse Magnetoplasma Rocket)

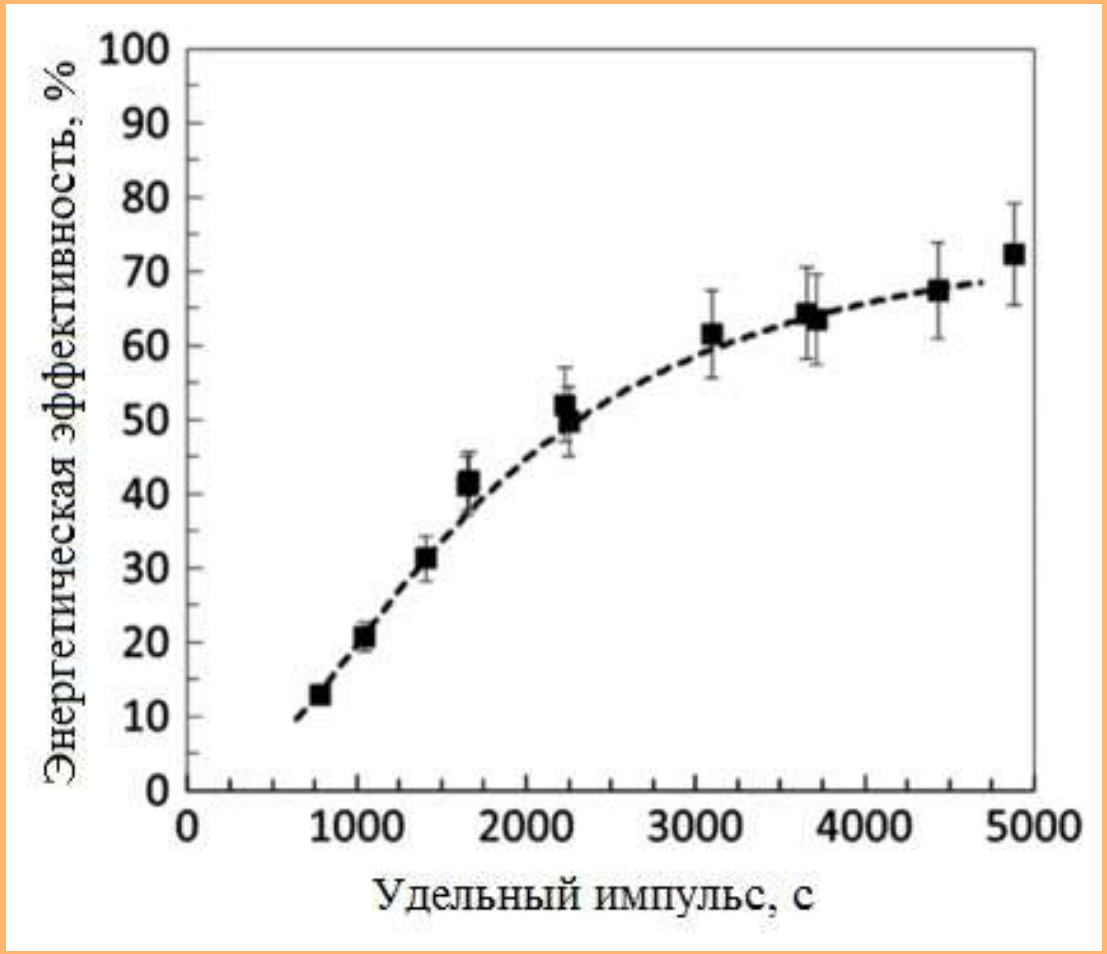




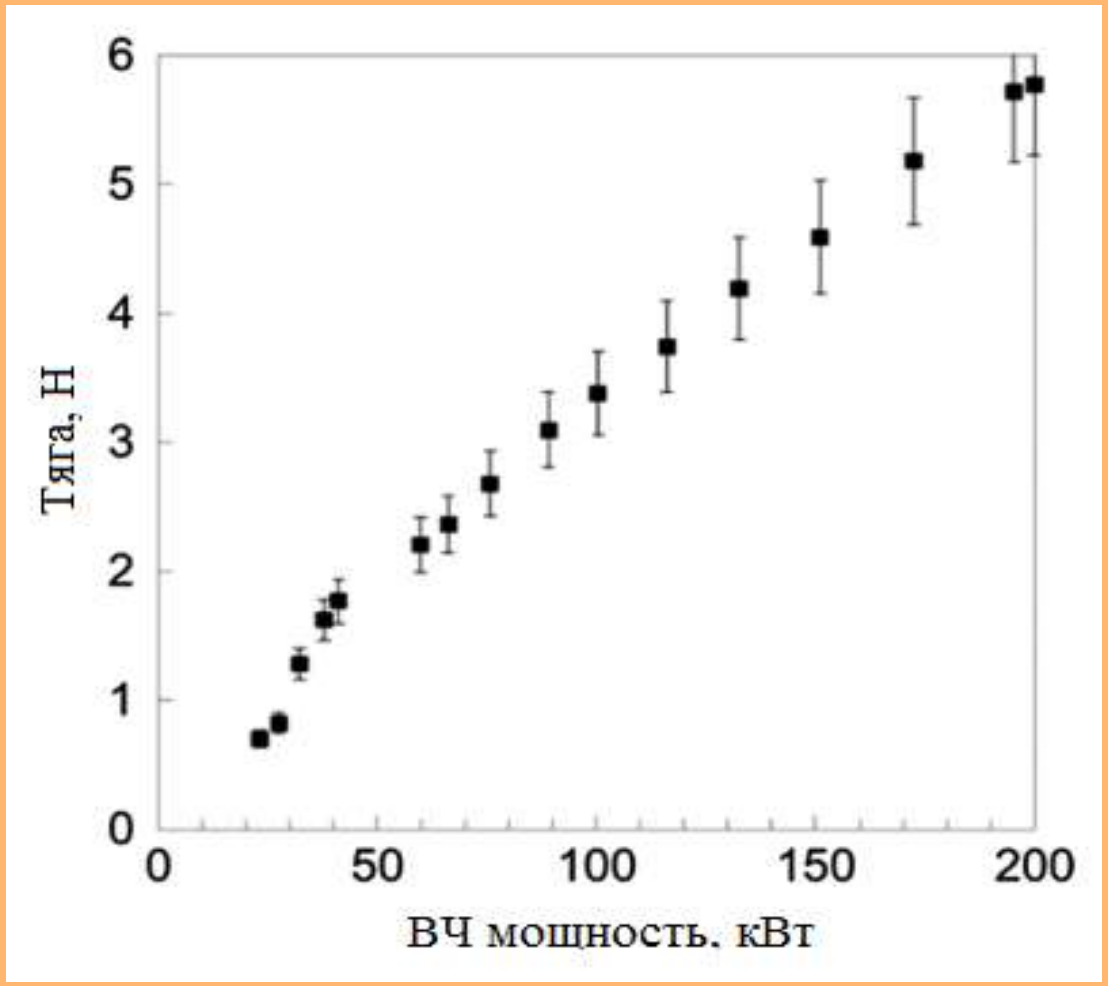
Параметры VX-200

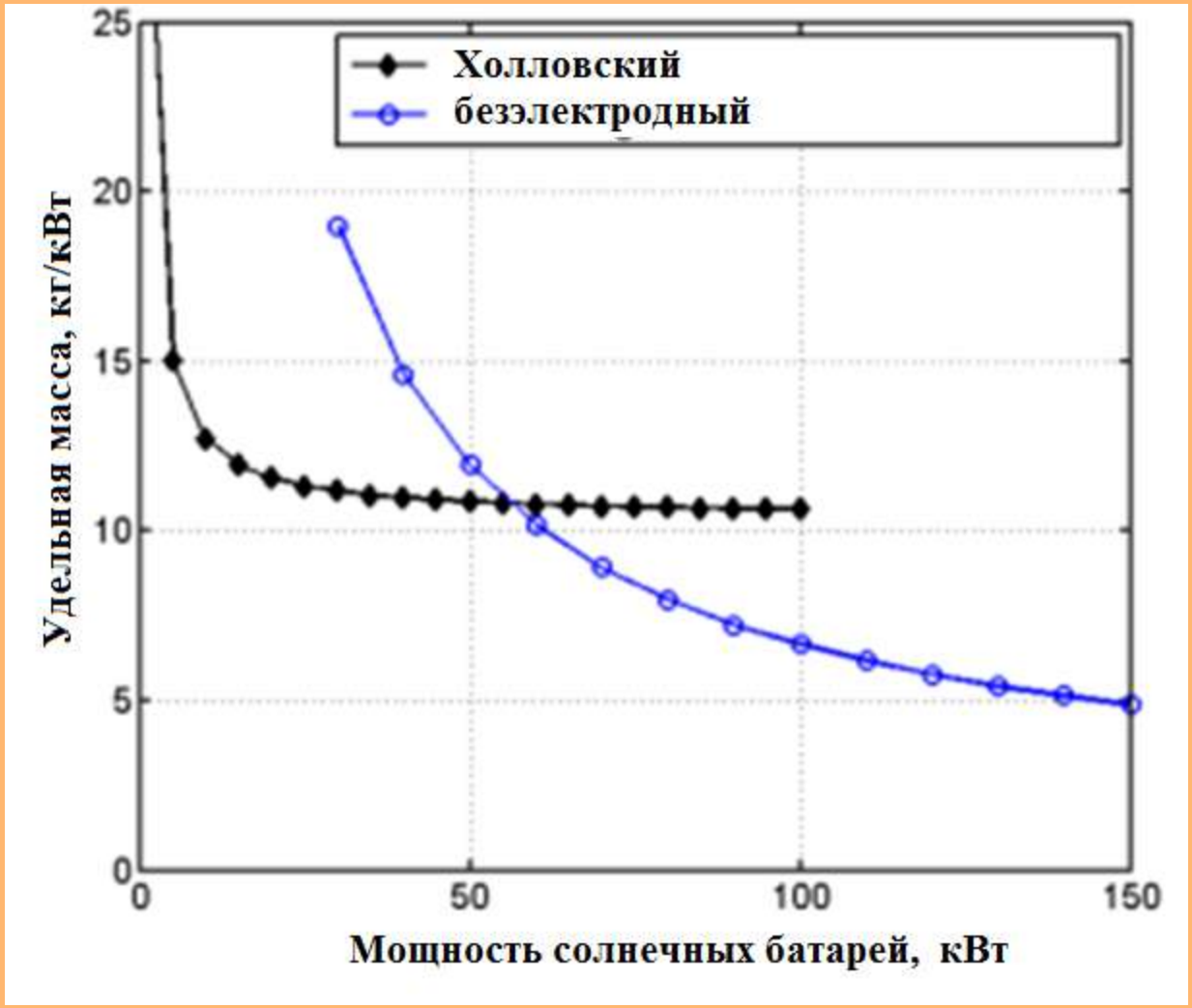
Мощность двигателя В том числе: Геликонный разряд ИЦР ускорение ионов	~ 200 кВт ~ 30 кВт, ~ 170 кВт
Частота геликонного генератора	6.78МГц
Частота ИЦР генератора	~0.5 МГц
Магнитное поле в зоне ИЦР	2 Тл
Магнитное поле в зоне геликонного разряда	0.1-0.2 Тл
Кпд ВЧ – генераторов: ИЦР генератор Геликонный генератор	 98% 91%
Тяговый кпд двигателя при максимальной мощности	72%
Максимальная тяга	5.8 Н
Рабочий газ	Ar
Максимальный расход газа	0.14 Г/с
Ионный поток	$1.7.10^{21}$ c^{-1}
Плотность мощности ускоренного плазменного потока	6 МВт/$м^2$

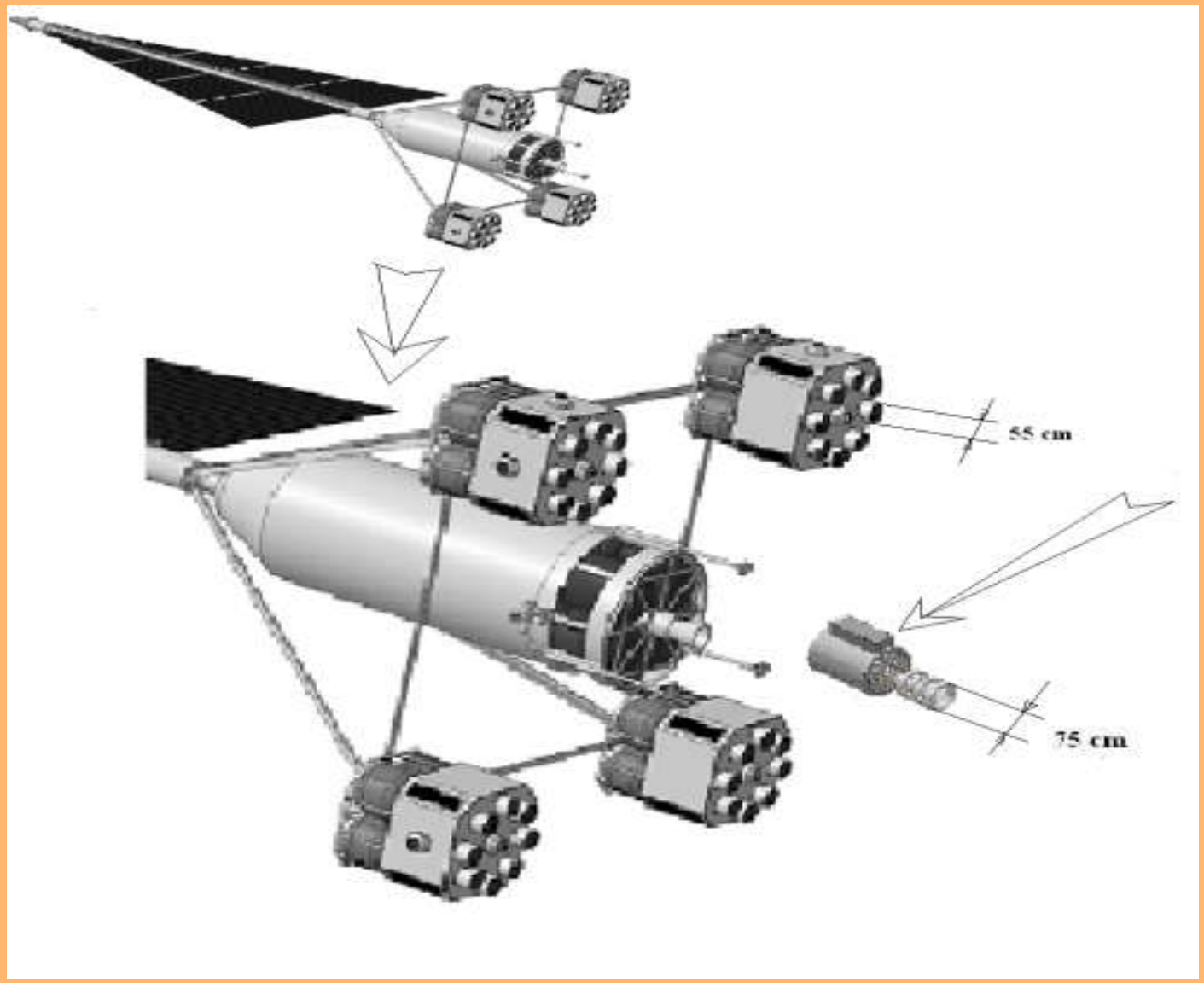
Зависимость полной энергетической эффективности двигателя от измеренного удельного импульса.



. Зависимость тяги двигателя от вводимой полной ВЧ мощности.




Холловский
безэлектродный
Удельная масса, кг/кВт
Мощность солнечных батарей, кВт
0
5
10
15
20
25
0
50
100
150


55 cm
75 cm

Параметры экспедиций

Для экспедиций внутри сферы гравитационноо влияния Земли (*~1.5 Мкм*)
Мощность 100 – 500 кВт.
удельный импульс Isp, ~ 5,000 с
отношении полной массы к мощности α ~ 10 кг/кВ

Для автоматических или грузовых межпланетных экспедиций
Мощность 1 – 5 МВт
удельный импульс Isp, ~ 4,000 с или 5000 с
при полной энергетической эффективности 60%
отношении полной массы к мощности α ~ 4 кг/кВт.

Для межпланетных экспедиций с экипажем
Мощность 10 – 200 МВт.
удельный импульс Isp, ~ 3,000 – 30000 с
при полной энергетической эффективности 60%
отношении полной массы к мощности α менее ~ 4 кг/кВт.

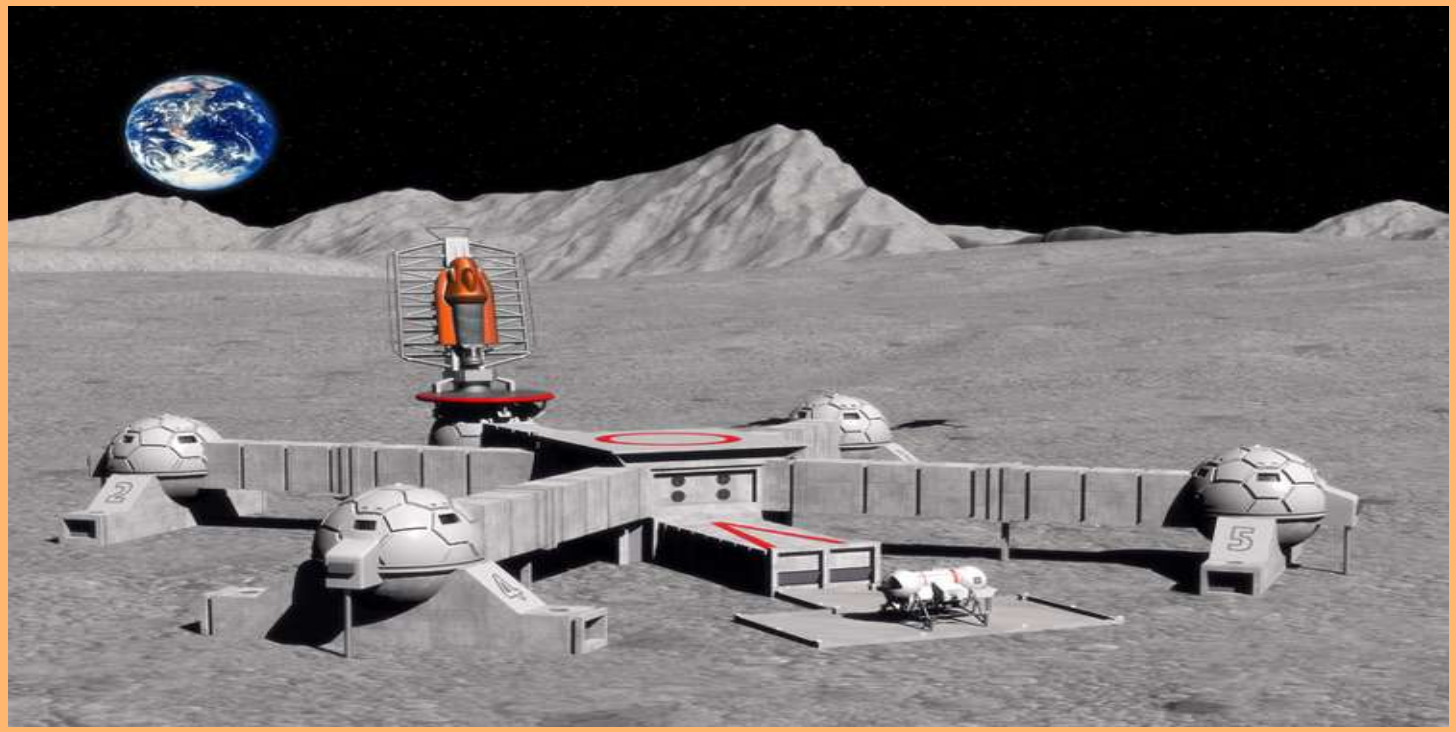
Выход на границу сферы влияния Земли

Низкая, но постоянная тяга даёт возможность достичь границы гравитационной
сферы влияния Земли (*1.5 Мкм*) по спиральной траектории.
Чтобы вывести 4000 килограммовый аппарат с Низкой Околоземной Орбиты (НОО)
на уходящую от Земли траекторию с помощью 200 кВт – ного VASIMR®a
требуется менее 600 кг аргона

Лунный буксир

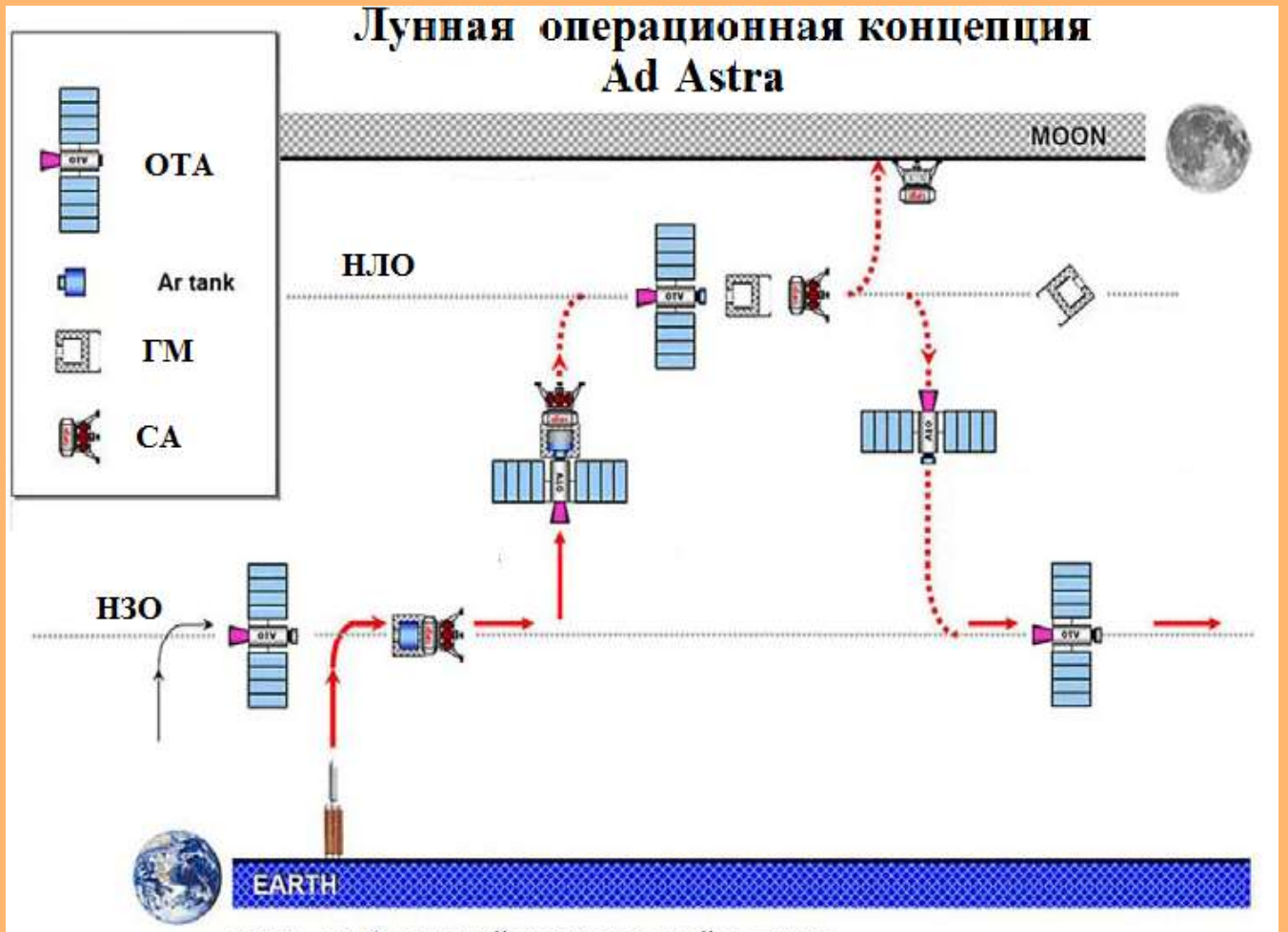
Если время в несколько месяцев приемлемо для доставки груза, буксир многократного использования на основе VASIMR®a позволит доставить на Луну примерно в два раза больше груза, чем потребовалось бы системе на основе химии при той же начальной массе на НОО

Эти двигатели делают реализуемой программу освоения Луны



Среднее расстояние до Луны 384 400 км
Расстояние до Солнца (а.е.) 149 600 000 км

Лунная операционная концепция Ad Astra

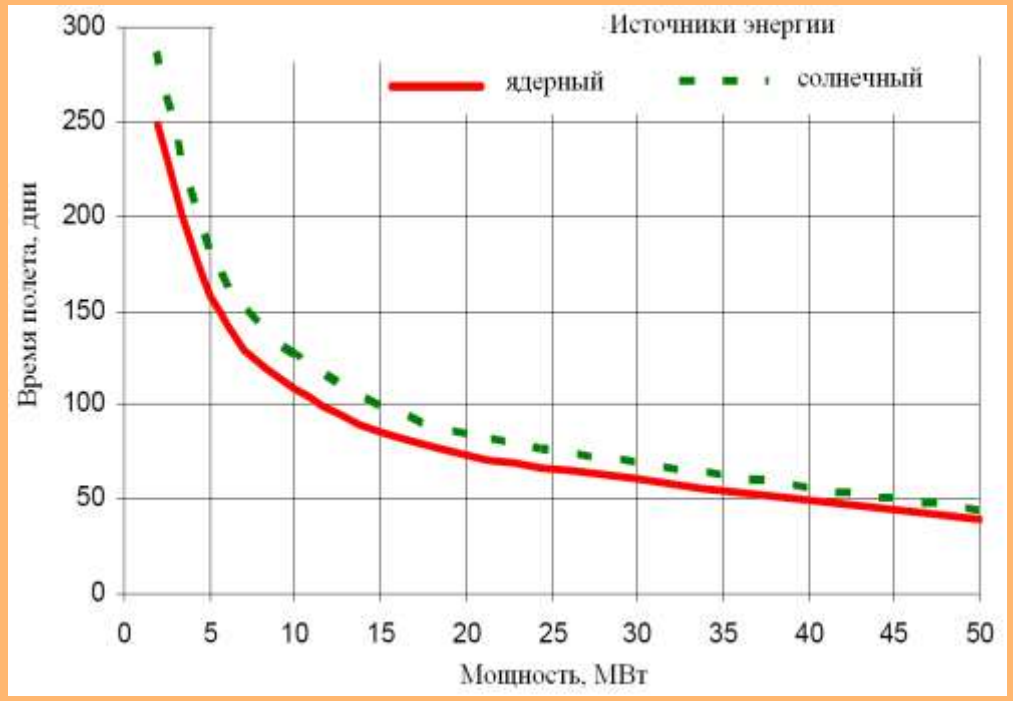


ОТА - орбитальный транспортный аппарат
ГМ - грузовой модуль
СА - спускаемый аппарат

Полет на Марс. Роль мощности двигателя.

VASIMR® Human Mission to Mars Andrew V. Ilin, Leonard D. Cassady, Tim W. Glover, Franklin R. Chang Diaz *Ad Astra Rocket Company*

Space, Propulsion & Energy Sciences International Forum March 15-17, 2011, University of Maryland, College Park, MD



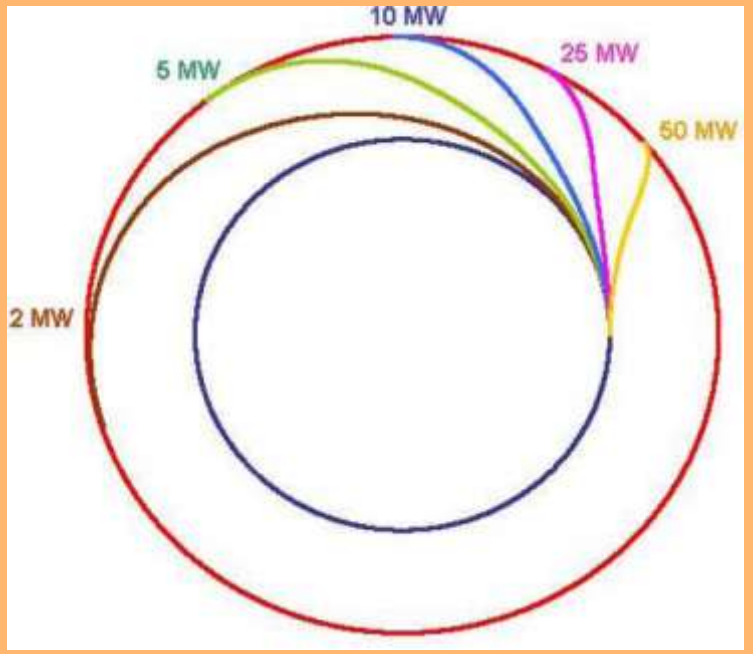
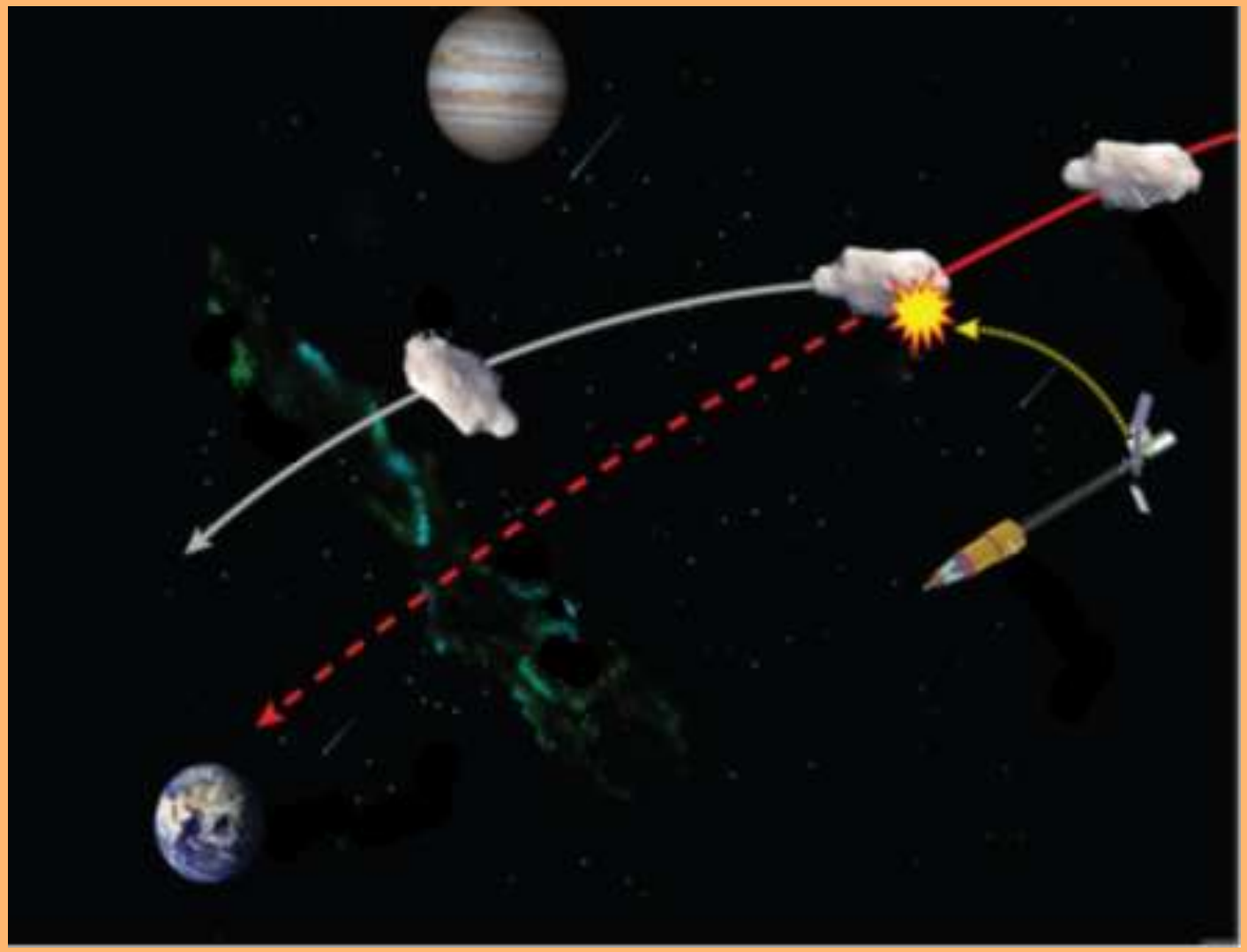


Схема изменения орбиты опасного астероида за счет взрыва термоядерного устройства на его поверхности



Термоядерные плазменные ракетные двигатели

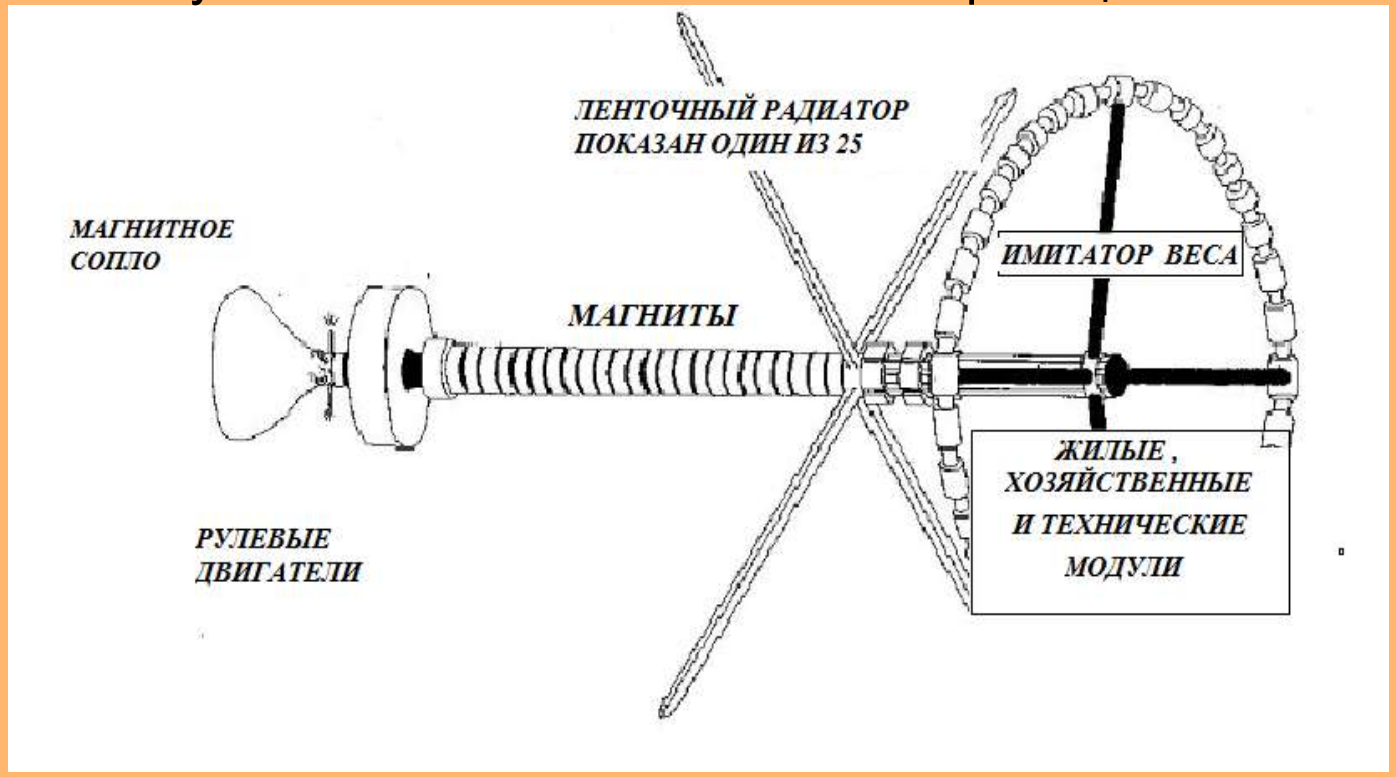
Термоядерный двигатель – идеальный вариант плазменного ракетного двигателя. Он, как и обычный химический, в принципе, дает возможность прямого преобразования кинетической энергии продуктов реакции в тягу.

Только реакция эта – реакция ядерного синтеза – даёт несравнимо больший энергетический выход чем химическая.

При этом, конечно, лучше использовать безнейтронную реакцию D - ^{3}He. Если при D – T реакторе можно таким образом использовать 20% выделяющейся энергии, то D - ^{3}He реактор увеличит эту цифру до 60%.

Ещё в 1991 году на Висконсинскм симпозиуме по использованию D – ^{3}He реакции синтеза был представлен доклад, посвящённый термоядерному ракетному двигателю на её основе и пример космического корабля для дальних полётов на основе тандемной ловушки

Компоновочная схема космического корабля с термоядерным двигателем на основе тандемной ловушки, представленая в 1991 году на Висконсинскм симпозиуме по использованию D – ^{3}He реакции синтеза.



По оценке автора (] John F. Santarius) ключевые параметры корабля выглядели следующим образом:

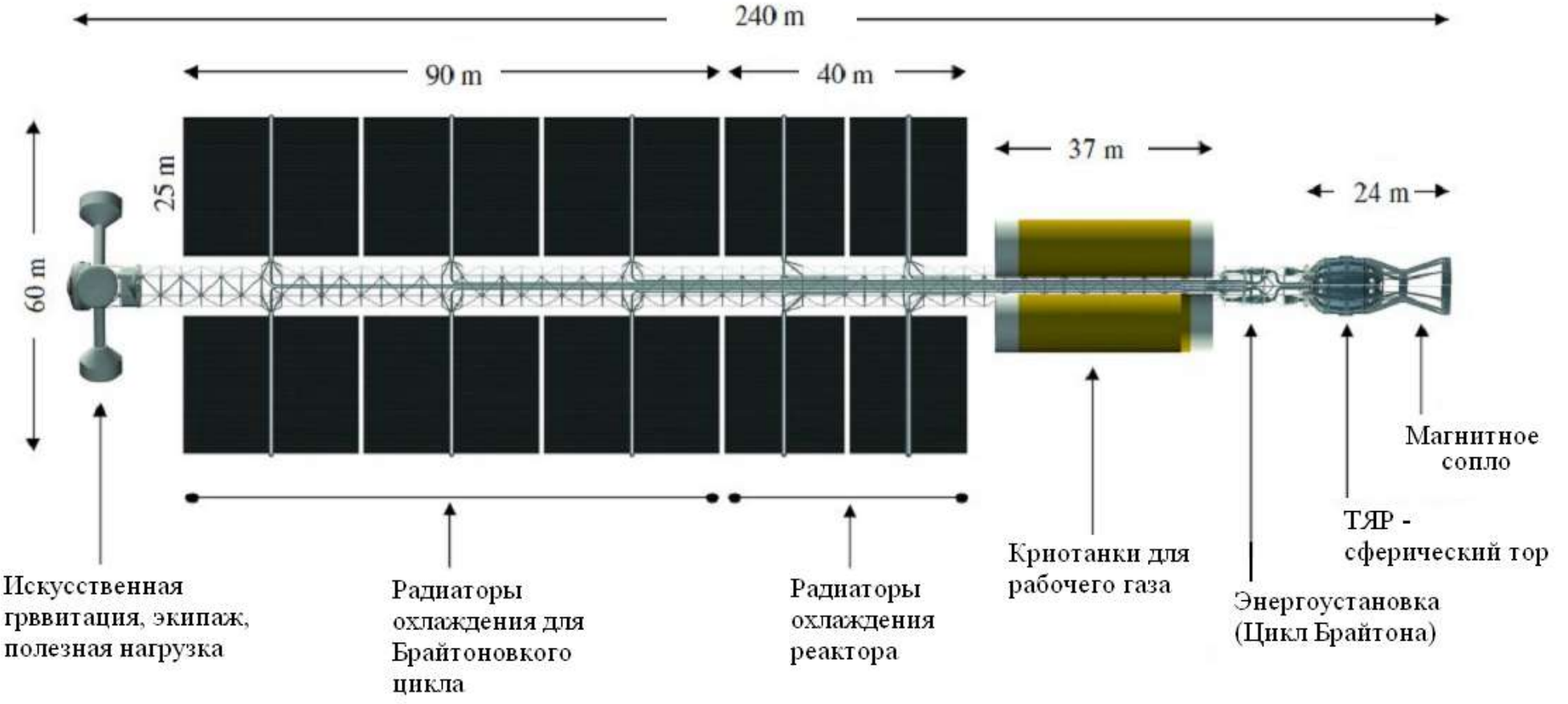
-удельная мощность 1 - 10 кВт/кг.

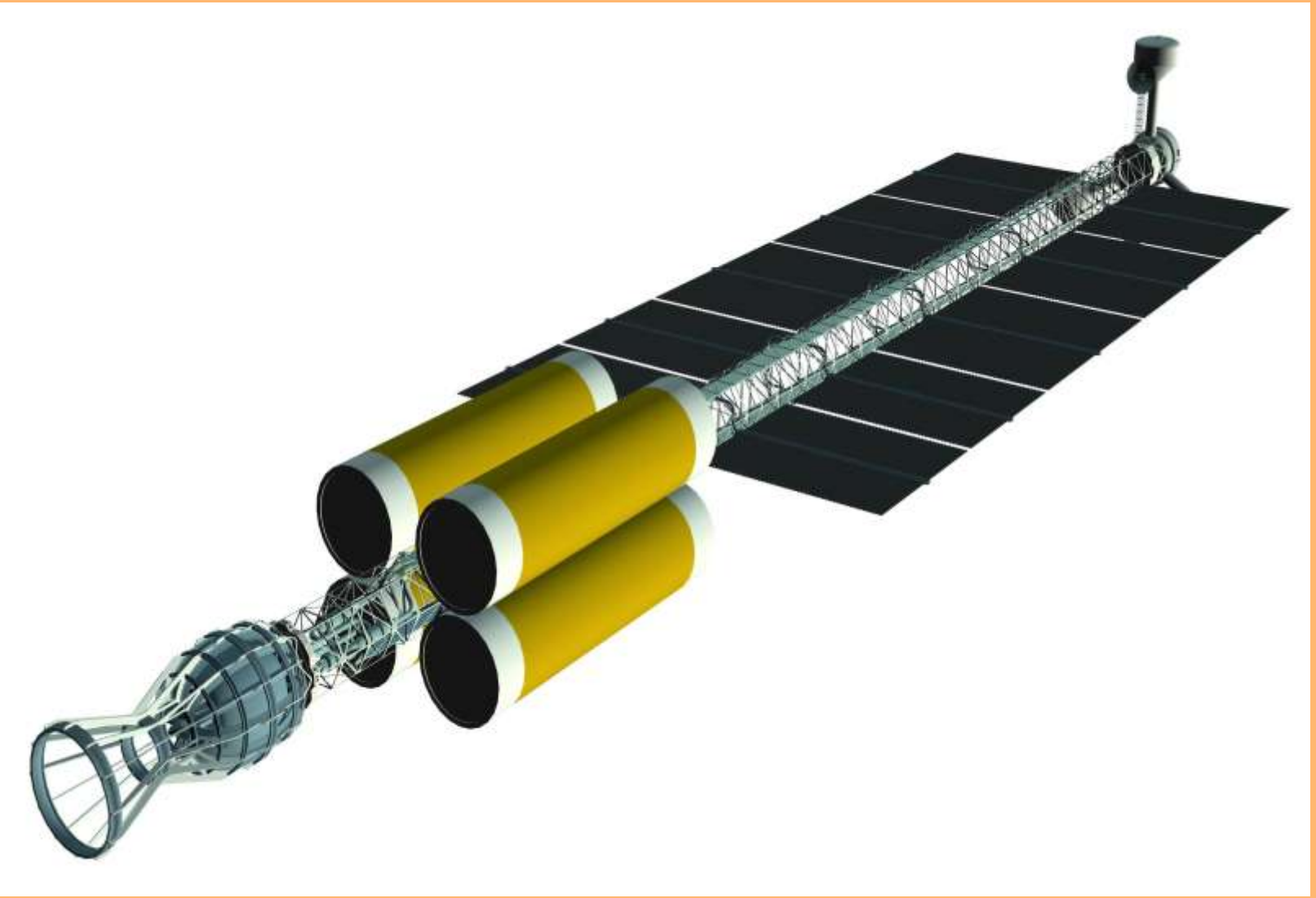
-удельный импульс 10^{3} – 10^{6} с

-отношение тяга/вес 10^{-1} – 10^{-5}

Дискавери – II

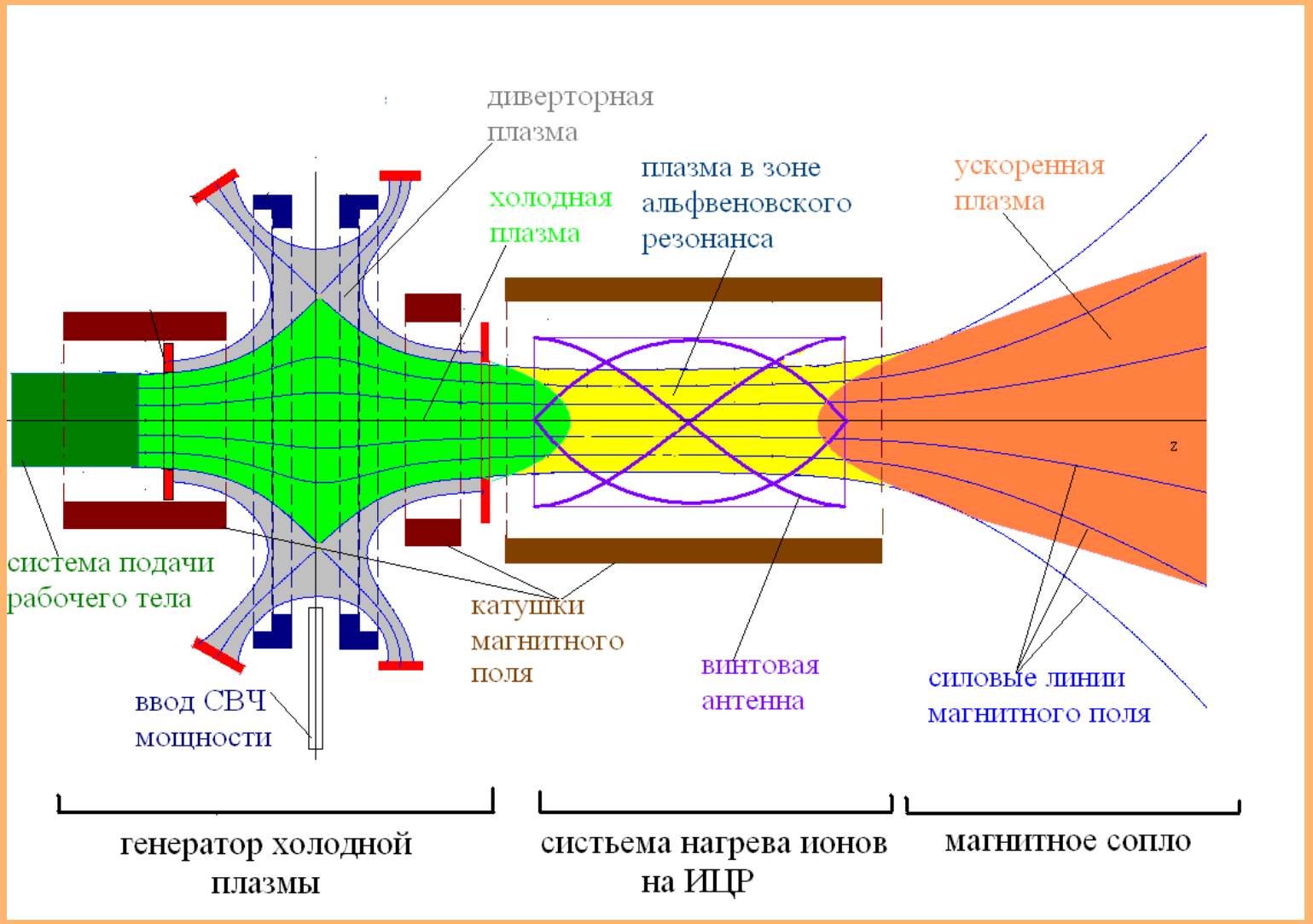
Космический корабль с термоядерным двигателем на основе сферического токаиака







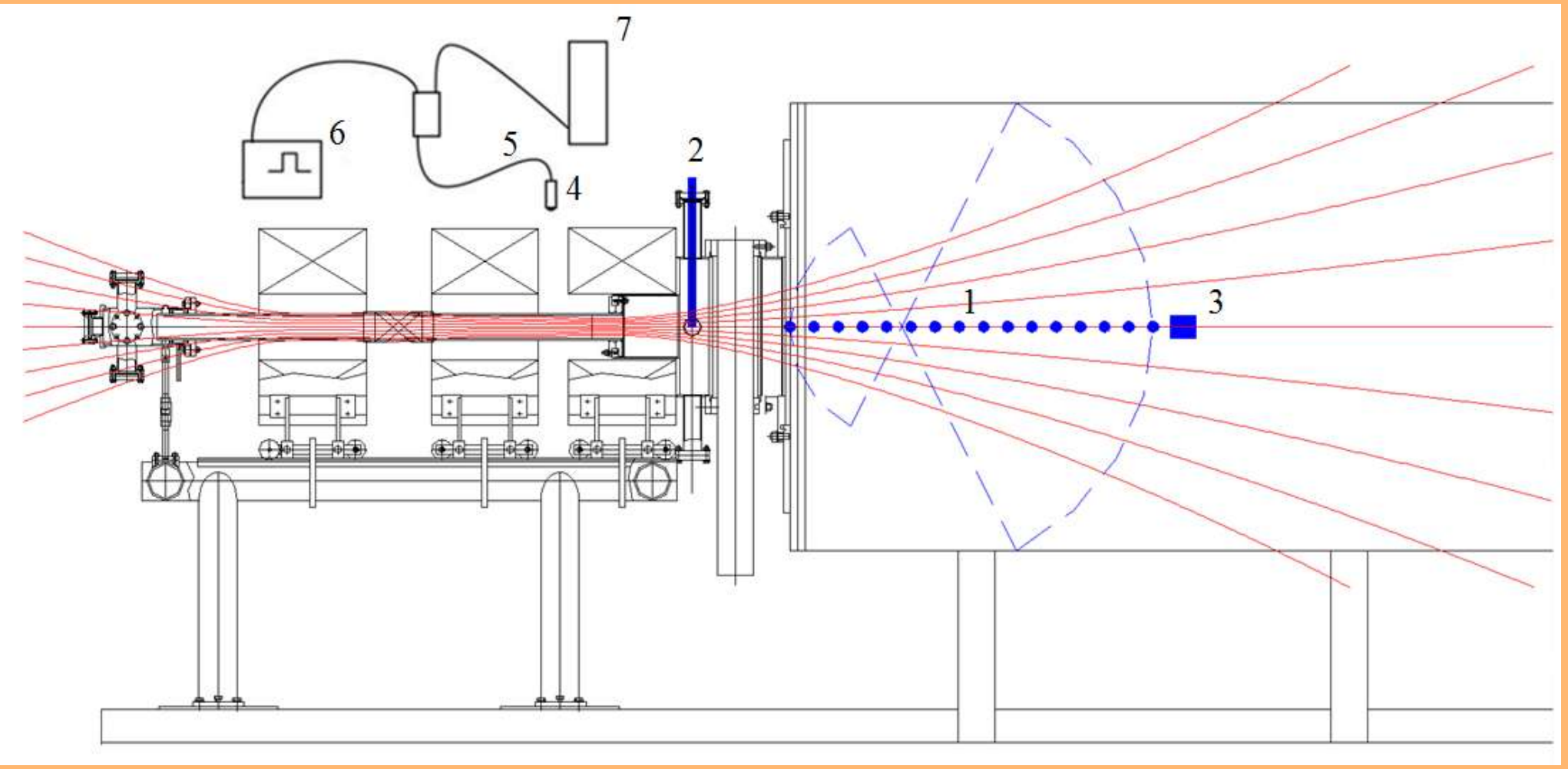
Установка ПС-1 в Курчатовском институте для исследования плазменных рабочих процессов в ПРД

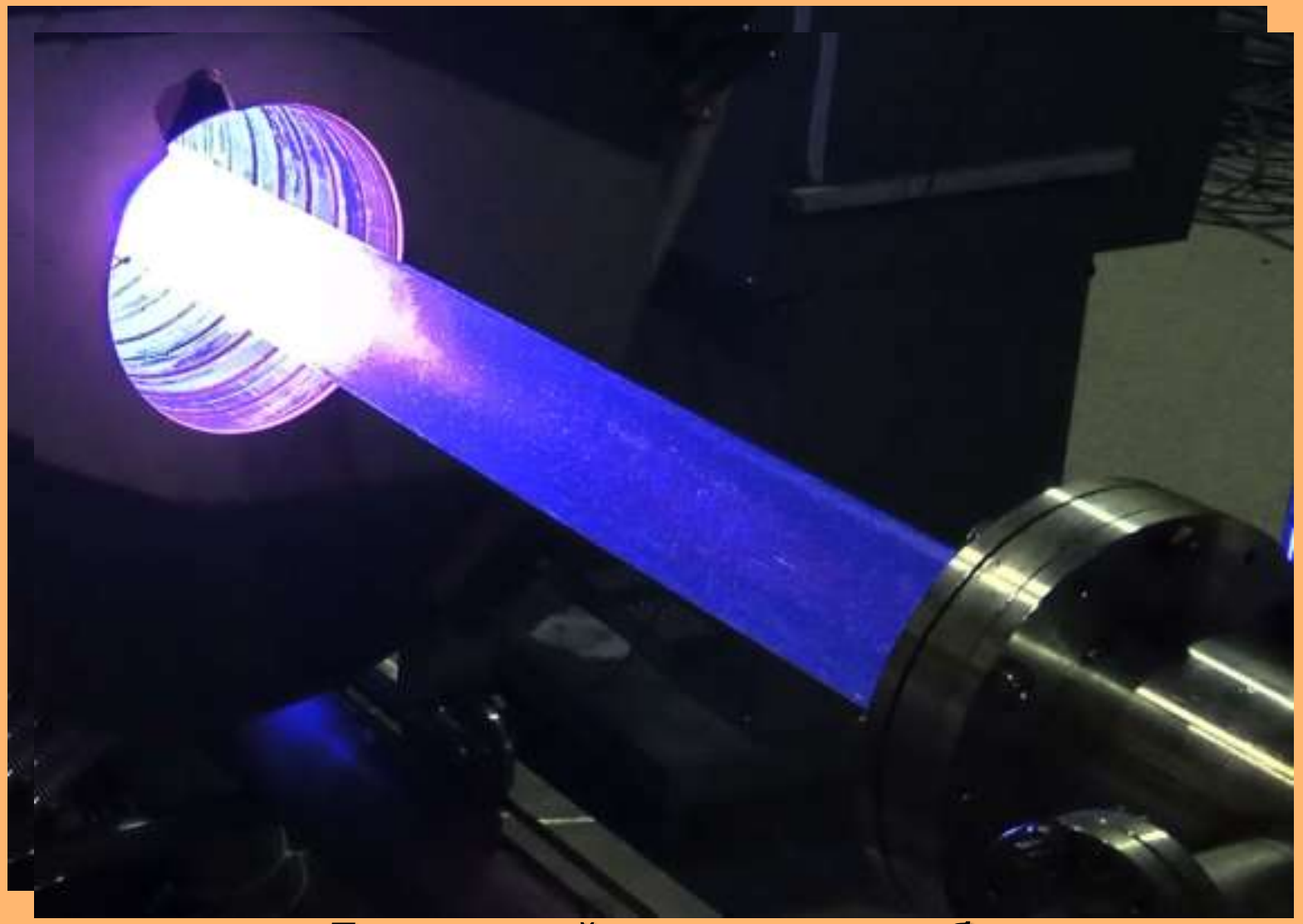

дивертерная плазма
холодная плазма
плазма в зоне альфвеновского резонанса
ускоренная плазма
z
система подачи рабочего тела
катушки магнитного поля
винтовая антенна
силовые линии магнитного поля
ввод СВЧ мощности
генератор холодной плазмы
систьема нагрева ионов на ИЦР
магнитное сопло



Стенд ПН-3 Для отработки геликонного источника плазмы для БПРД

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР «КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»


7
6
5
4
2
1
3



Геликонный источник в работе

Геликонный источник в работе

Возможности новых транспортных технологий

Томас Джефферсон предсказывал в 1803 году, что освоение присоединенной Луизианы займет 800 лет.



Введение новой технологии – железнодорожного сообщения – сократило время поездки от Нью-Йорка до Чикаго с 6 недель до 2 дней. Луизиану освоили быстрее, чем за 20 лет.