

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана»
Факультет Энергомашиностроение
Кафедра Э8 Плазменные энергоустановки

ОБЗОР РАЗРАБОТОК ЭРД ДЛЯ МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Преподаватель: Семенкин А.В.
Студент: Шумейко А.И.

Москва
2018 г.

Классификация малых космических аппаратов по массе

По данным [1], малые космические аппараты (МКА) классифицируют следующим образом:

Характеристика	Фемто-	Пико-	Нано-	Микро-	Мини-
Масса КА, кг	0,01-0,1	0,1-1	1,25-12,5	12,5-125	125-625

Малые космические аппараты типа CubeSAT принадлежат к категории пико-КА, однако их максимальная масса может достигать массы нано-КА.

Программа по разработке МКА типа CubeSAT впервые была предложена инженерами Калифорнийского государственного политехнического университета и Стэнфордского университета в 1999 год.

**m МКА типа
CubeSAT 0,1-8 кг**

МКА типа CubeSAT

Размер одной единицы МКА типа CubeSAT $10 \times 10 \times 10$ см³. Такой размер обозначают 1U. Существуют четыре стандартных размера: 0,5U; 1U; 2U; 3U. На данный момент существуют разработки CubeSAT размером 6U [3].

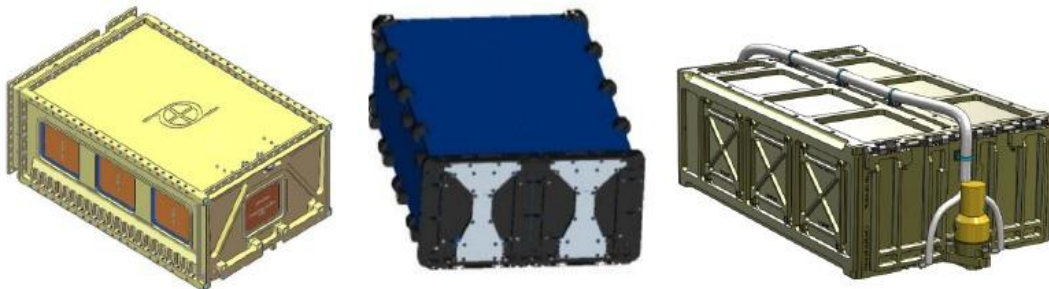
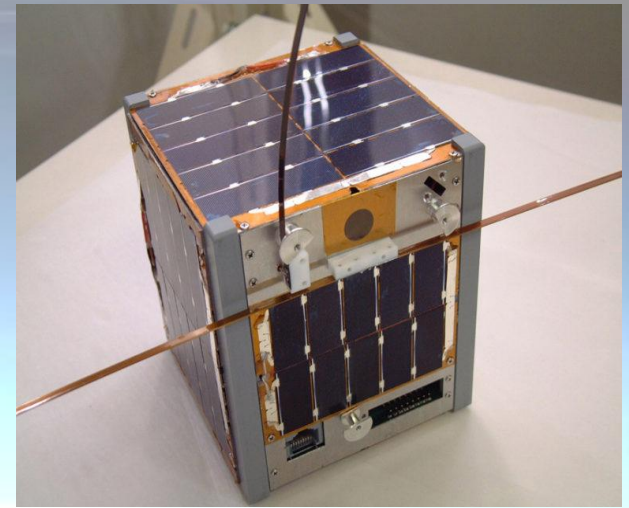
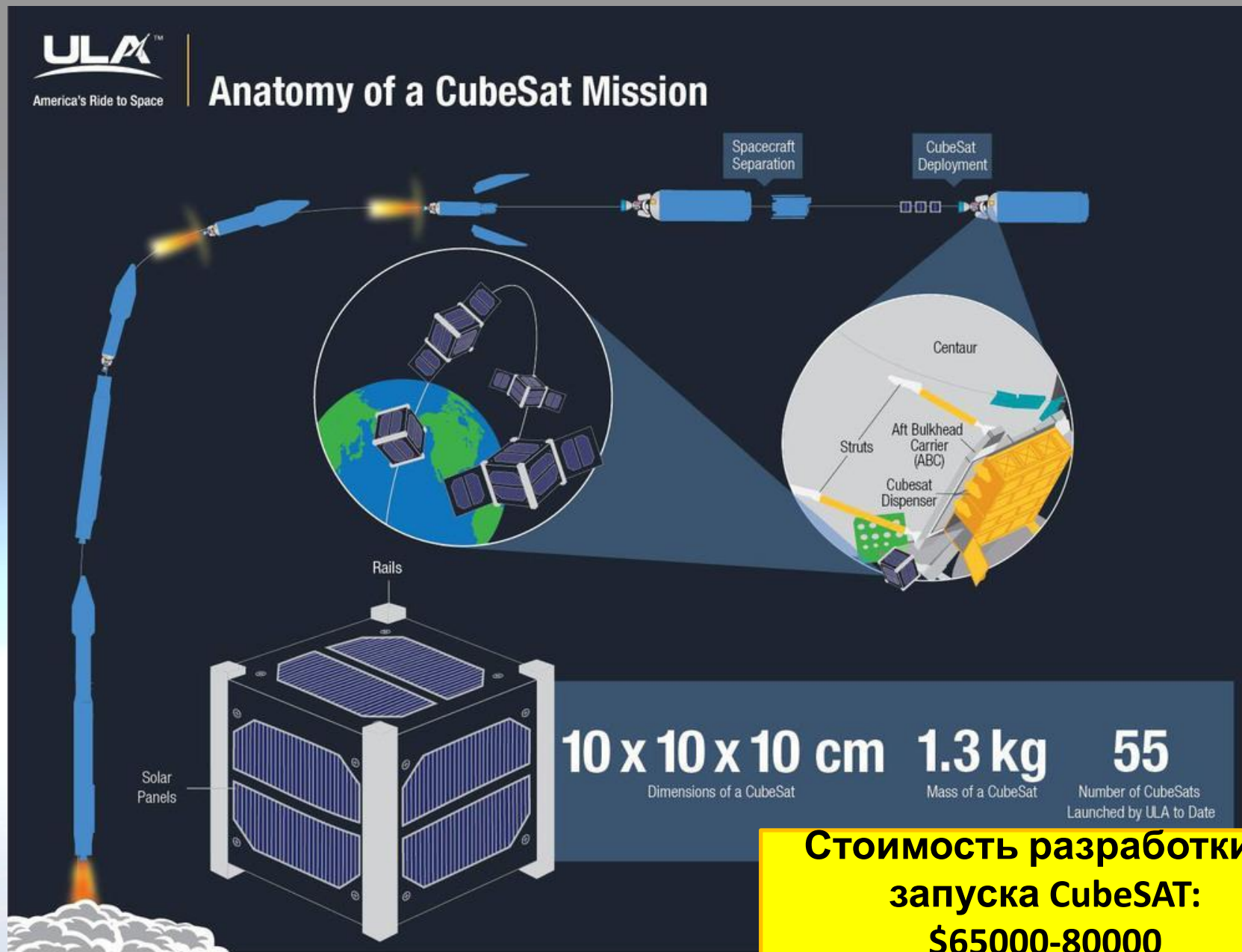


Figure 3a, 3b and 3c: Three Dispensers for 6U CubeSats designed by Planetary Systems Corporation (left) ISIS (center) and Tyvak (right)

**CubeSAT
собирается как
конструктор из
стандартного
кубика 1U.**

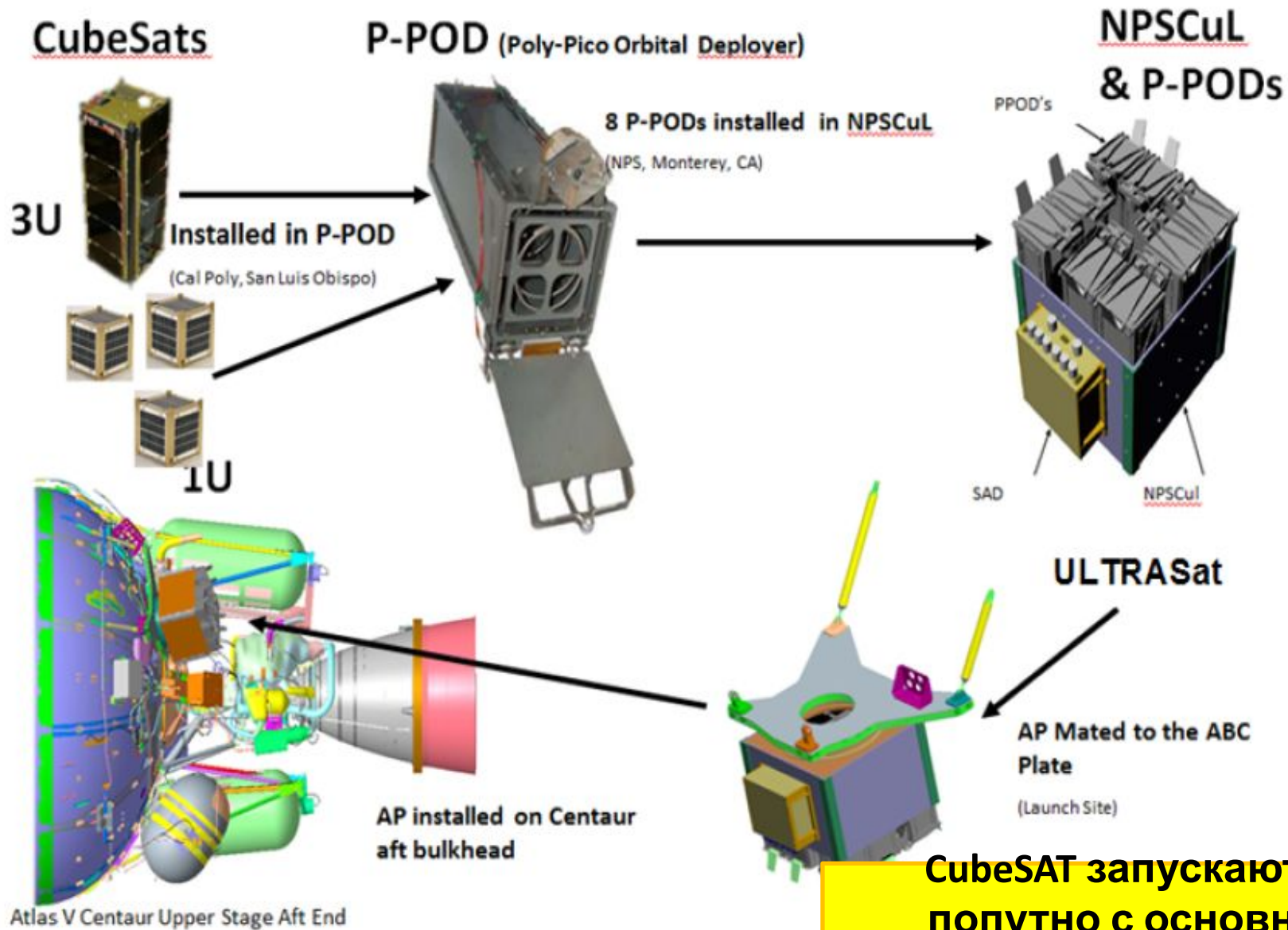
Запуск аппаратов CubeSAT

[4]



Запуск аппаратов CubeSAT

[5]



CubeSAT запускаются
попутно с основной
полезной нагрузкой

Двигатели малых космических аппаратов

Cold Gas Thrusters

**Химические
двигатели**

**Электрические
двигатели**

**Продвинутые
технологии**

Бак с рабочим
телом; клапан;
сопло.
Максимальный
удельный
импульс равен
76 с.

**Mono-Propellant;
MEMS Solid
Rocket Motor**

**Resistojet
IT
PPT
Electrospray
Helicon Thruster**

**ALP;
Electric solar-wind
sail;
Electrodynamic
tether**

**Требование CDS к ДУ:
давление в баке с рабочим
телом <1,2 атм**

Ограничения на ДУ малых КА

По данным [2], предъявляются следующие ограничения к двигателям малых космических аппаратов.

Ограничение	Нано-	Микро-	Мини-
Объем двигателя, л	<1	7	50
Мощность, Вт	6	14	180
Масса ДУ, кг	1-10	10-100	100-500
Масса КА, кг	1,25-12,5	12,5-125	125-625

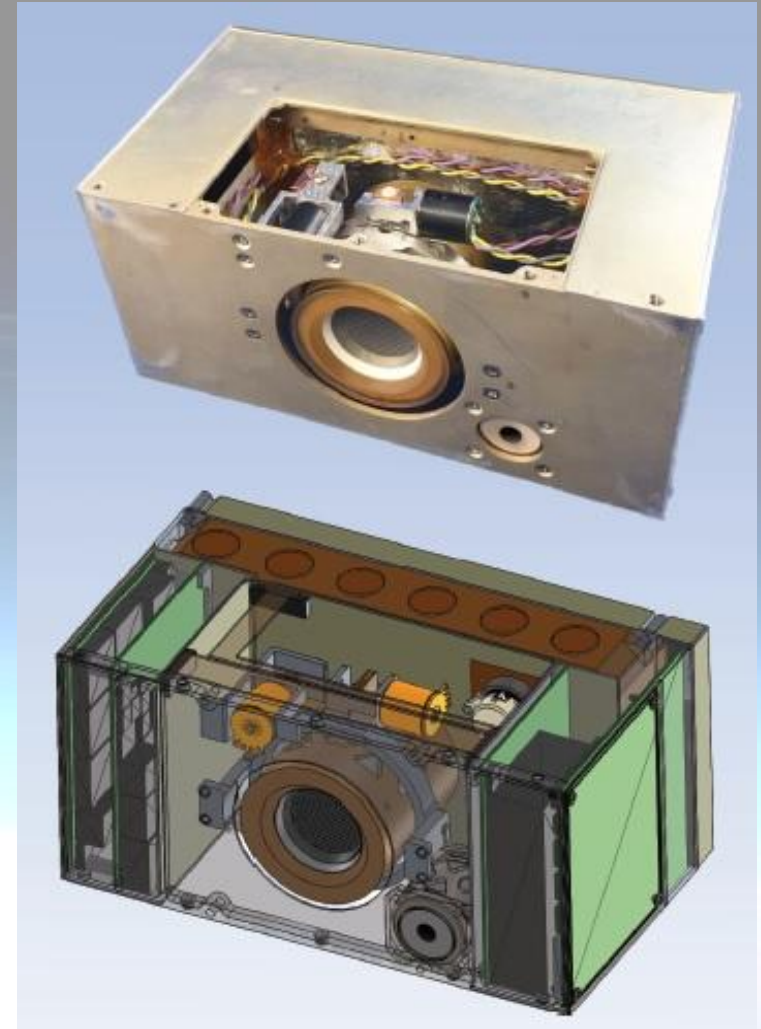
Ограничения накладываются вследствие того, что с уменьшением размера космического аппарата, уменьшаются:

1. Объемы спутника, отсюда следует снижать объем ДУ, чтобы было достаточно места на полезную нагрузку;
2. Мощность, вырабатываемая энергоустановками космического аппарата, отсюда следует снижать мощность, потребляемую ДУ.

**m и V ДУ
достигают 80 % от
m и V МКА**

Busek Ion Thruster BIT-3

Характеристика	Величина [6]
Тяга, мН	0,66-1,24
Удельный импульс, с	1400-2640
Габариты ДУ, мм	108*88*102
Масса с рабочим телом, кг	3
Потребляемая мощность, Вт	50-80
Входное напряжение, VDC	28
Расход рабочего тела, мкг/с	48
Рабочее тело	Хе, I
КПД	0,5



BIT-3 RF Ion with Xenon Propellant



BIT-3 RF Ion with Iodine Propellant

**Ресурс: 20000 ч.
Запуск состоится в
2019 году. КК –
BRFC-1.**

Busek's Ion Thrusters BIT

[7]



MODEL	BIT-1	BIT-3	BIT-7
COMPLETE SYSTEM INPUT POWER*	28 W	75 W	460 W
NEUTRALIZER	BRFC-1 RF CATHODE	BRFC-1 RF CATHODE	BHC-1500 HOLLOW CATHODE
ION BEAM CURRENT	2.7 mA	16 mA	160 mA
THRUSTER PROPELLANT FLOW (Xe)	0.06 sccm	0.5 sccm	3.0 sccm
NEUTRALIZER PROPELLANT FLOW (Xe)	0.06 sccm	0.08 sccm	0.5 sccm
THRUST	185 μ N	1.15 mN	11.0 mN
TOTAL SPECIFIC IMPULSE**	1,600 sec	2,100 sec	3,300 sec

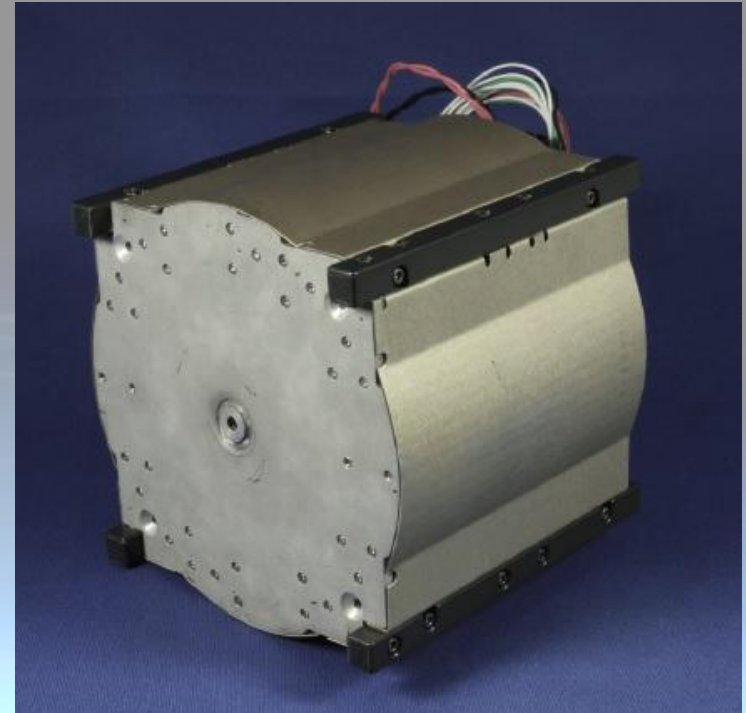
*Nominal value, includes neutralizer and estimated Power Processing Unit (PPU) efficiency

**Includes neutralizer propellant consumption

**BIT-1 - инженерная
модель.**

Busek Micro Resistojet

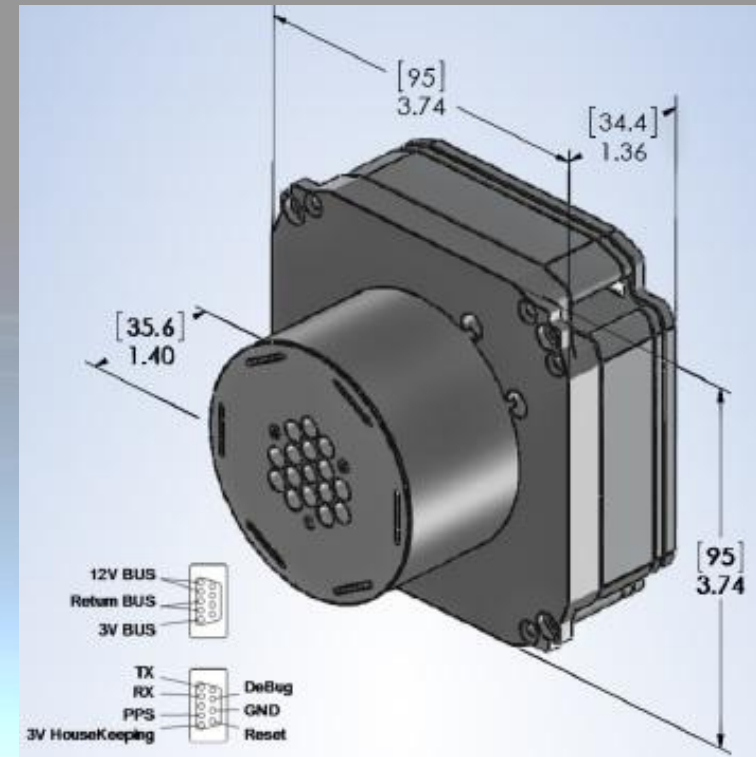
Характеристика	Величина [8]
Тяга, мН	2-10
Удельный импульс, с	150
Кол-во двигателей в ДУ	9
Тяга ACST, мН	0,5
Удельный импульс ACST, с	80
Габариты ДУ, мм	9*9*10
Масса с рабочим телом, кг	1,25
Потребляемая мощность, Вт	3-15
Суммарный импульс, Н*с	404
Объем системы	1U
Входное напряжение, VDC	5
Объем бака с р.т.	48
Рабочее тело	NH3



**Инженерная
модель**

Micro PPT BmP-200

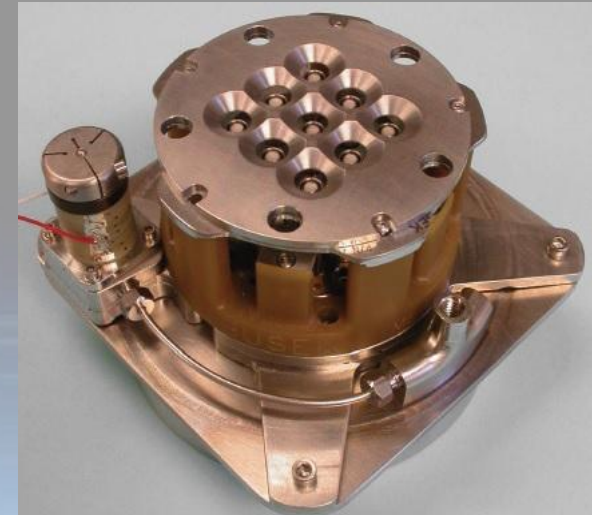
Характеристика	Величина [9]
Impulse Bit, мН*с	0,02
Удельный импульс, с	536
Объем, см ³	310
Масса ДУ, кг	0,5
Потребляемая мощность, Вт	1,5 (1 Гц) 7,5 (7 Гц)
Суммарный импульс, Н*с	220 (40 г р.т.)
Входное напряжение, VDC	5
Рабочее тело	PTFE



**Предшествующая
модель работала
7 лет на борту
FalconSAT-3**

Busek Electrospray Thruster BET-1mN

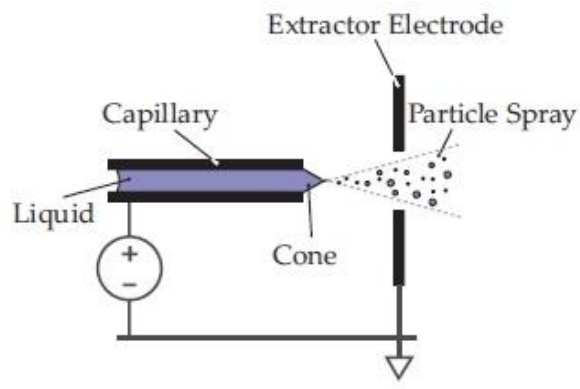
Характеристика	Величина [11]
Тяга, мН	0,7
Удельный импульс, с	800
Габариты ДУ, см	8,5*8,5*6
Масса ДУ, кг	1,15
Объем ДУ	1U
Потребляемая мощность, Вт	15
Входное напряжение, VDC	9-12,6
Рабочее тело	ionic liquid (salt in the liquid state)
Суммарный импульс, Н*с	605 (50 мл р.т.)



[11]



[12]

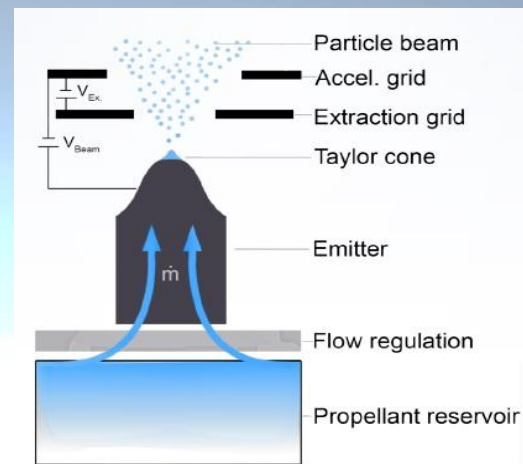
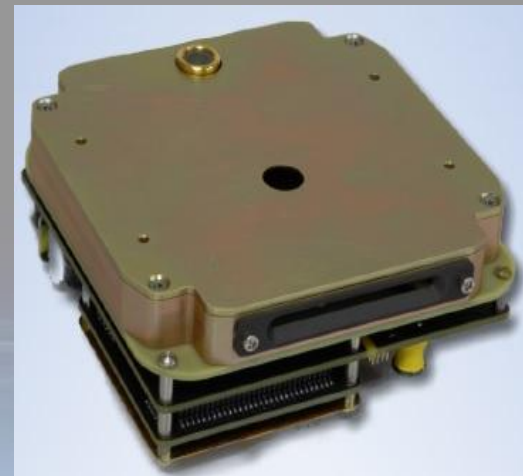


[10]

КПД
Busek-1mN
выше 80%

Busek Electropray Thruster BET-100

Характеристика	Величина [13]
Тяга, мН	5-100
Удельный импульс, с	1000-1800
Габариты ДУ, см	9*9*4
Масса ДУ, кг	0,55
Объем ДУ	0,5U
Потребляемая мощность, Вт	5,5
Входное напряжение, VDC	11,5
Рабочее тело	ionic liquid (salt in the liquid state)
Суммарный импульс, Н*с	175 (6,5 мл р.т.)



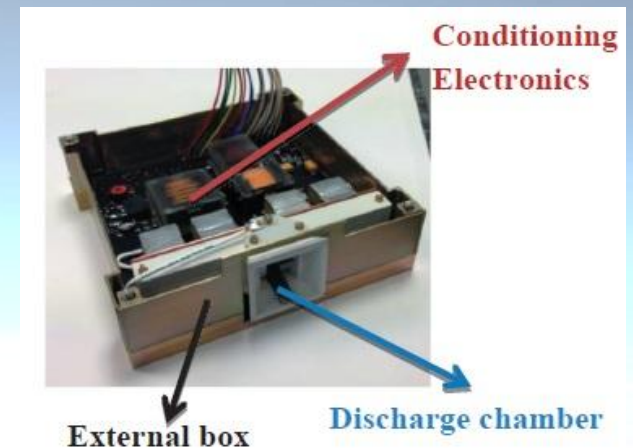
**КПД Busek-100
выше 80%**

Mars Space Ltd PPTCUP

Характеристика	Величина
Impulse Bit, мН*с	0,04 [14]
Удельный импульс, с	600 [14]
Габариты ДУ, см	10*10*3,3 [16]
Масса ДУ, кг	0,28 [14]
Объем ДУ	0,5U
Потребляемая мощность, Вт	2 [14]
Входное напряжение, VDC	7,6 [16]
Рабочее тело	PTFE [16]
Суммарный импульс, Н*с	44 [14]



[15]

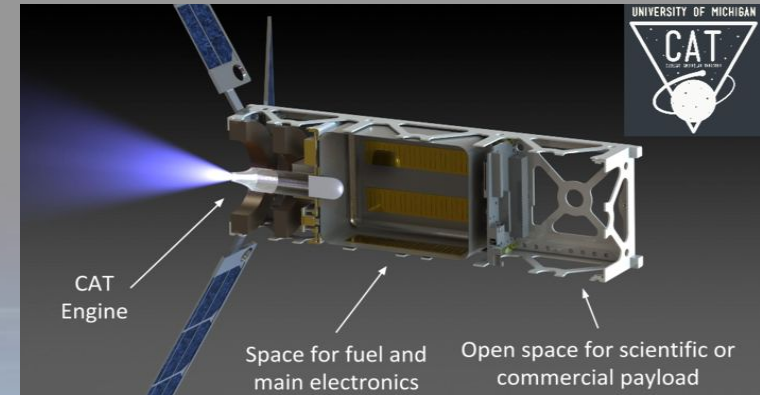


[16]

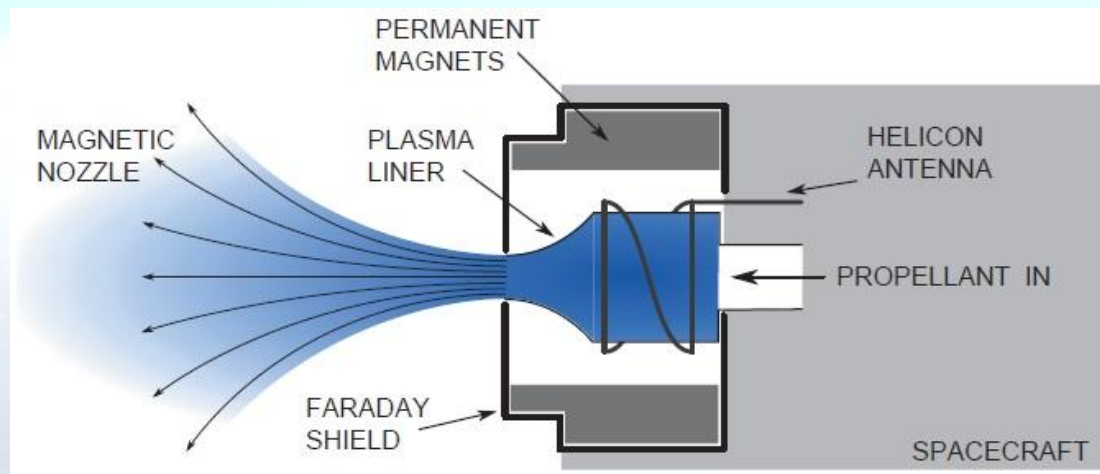
**КПД Busek-100
выше 80%**

CubeSAT Ambipolar Thruster

Характеристика	Величина [18]
Тяга, мН	0,5-4
Удельный импульс, с	400-800
КПД	0,1-0,4
Магнитное поле, Тл	0,08
Объем ДУ	0,5U
Потребляемая мощность, Вт	10-50
Масса ДУ, кг	1,5
Рабочее тело	Хе; Ar



[19]



**Разработан в
Мичиганском
университет
е**

Ионные двигатели

Двигатель	D, см	Уровень разработки	$I_{уд}$, с	F, мН	$W_{потр}$, Вт
RIT μ X	7.8	TRL 5	300-3000	0.01-2.5	<50
μ N RIT-2.5	2.5	TRL 4	2800	0.5	34
BIT-1	1	TRL 5	1600	0.19	28
BIT-3	3	TRL 5	1400-264 0	0.66-1.2 4	56-80
MiXI	3	TRL 4	1764-293 4	0.4-1.0	14-25
MELCO-2	5	TRL 4	2000	2	64
IT-5 (ИД-50)	5	TRL 4	2700-400 0	2.2-5.4	50-150
CubeSat Ambipolar Thruster		TRL 5	800	1	5

Resistojet

Двигатель	Уровень разработки	$I_{уд}$, с	F, мН	$W_{потр}$, Вт	Масса, кг
Busek MRJ	TRL 5	150	2-10	3-15	1.25
XR-150-050	TRL 6	49Xe 60Kr	150	50	0.22
Propulsion Unit for CubeSats (CUAerospace)	TRL 6	72	5.4	15	0.72
CubeSat High Impulse Propulsion System	TRL 5	82	30	30	1,2

PPT

Двигатель	Уровень разработки	$I_{уд}$, с	$W_{потр}$, Вт	Масса, кг	Ресурс, pulses	$I_{сум}$, кНс
PRS-101	Лётный	1350	100	4.47	694.4 ч	
ЕО-1	Лётный (ЕО-1)	1040	60	4.96	$5.3 \cdot 10^5$	0.46
АИПД-8	Лаб. образец	520	10-20	2.0	$5.5 \cdot 10^6$	0.6
ИПД-120	Прототип летного образца	716	60	3.0	$2 \cdot 10^6$	0.7
АИПД-45-2	Лётный образец (МКА-ФКИ, ПН-2)	1100	75-150	10.5	$1.67 \cdot 10^7$	20
АИПД-155	Лётный образец (Союз-Сат-О)	1320	70-140	14	$1.5 \cdot 10^7$	30
АИПД-95	Лаб. образец	1600	170	20	$1.5 \cdot 10^7$	52
μ PPT-1(MPACS)	Лётный (FalconSat-3)	827	10	7.5		
BmP-220	Лаб. образец	536	7.5	0.5		0.22
PPTCUP	TRL 8	600	2	0.280	$2 \cdot 10^6$	0.05
Micro PPT	TRL 4	600	5	0.350		0.19

Electrospray thruster

Двигатель	D, см	Уровень разработки	I _{уд} , с	F, мН	W _{потр.} , Вт	Масса, кг
BET-1mN	8.5	Лаб. образец	800	0.7	15	1.15
BET-100	9		1000-1800	0.005-0.1	5.5	0.550
Busek PUC	18	TRL 5	800	0.7	15	1.15
S-iEPS	1	Лаб. модель	1717	0.080	≤1.5	0.1
FT-150		TRL 7	3000-5000	≤0.15	≤6	1.4
IFS-N	10	TRL 6	>5000	≤0.15	≤9	0.250
IFM-350		TRL4	>6000	≤2	≤160	