



МГТУ им. Н.Э. Баумана

Всероссийская студенческая конференция «Студенческая
научная весна», посвященная 170-летию В.Г. Шухова

Аэрокосмический факультет

Апрель 2023

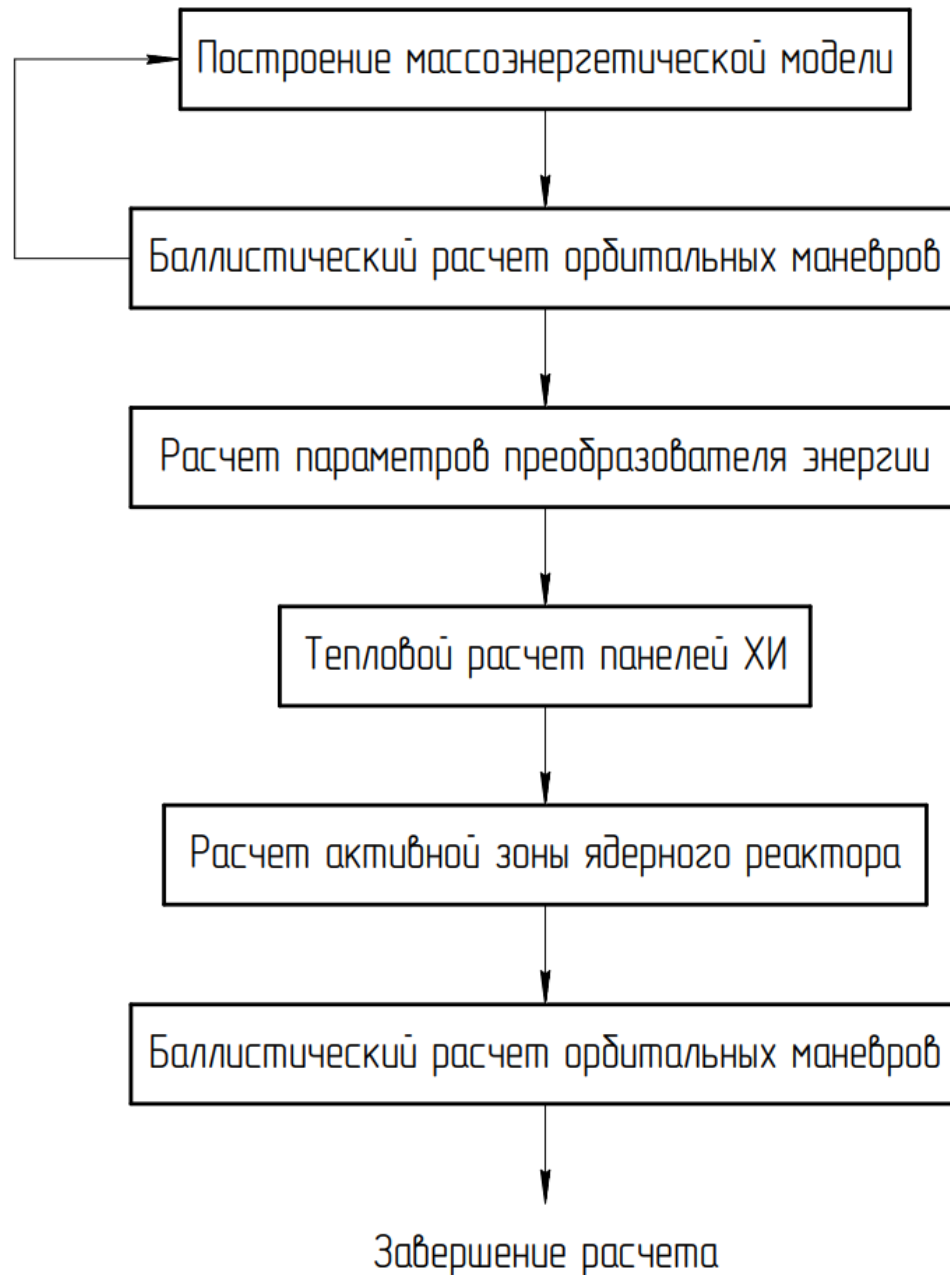


Алгоритм аналитического проектирования космического аппарата с ядерной энергодвигательной установкой

Подготовил студент гр. АК1-101 Пашин Р.А.

Научный руководитель: к.т.н. доц. каф. СМ-2 Дмитриев С.Н.

Общая схема алгоритма



Проектирование автоматической межпланетной станции с ЯЭДУ

Целевые задачи:

- Полет к системе Сатурна;
- Комплексное исследование системы Сатурна не менее 5 лет;
- Спуск аппарата на поверхность Титана.



Конструктивная схема КА с ЯЭДУ

Массоэнергетическая модель

Начальная масса КА:

$$M_0 = M_{\text{ПН}} + M_{\text{кон}} + M_{\text{РТ}} + M_{\text{ЯЭДУ}};$$

$$M_{\text{кон}} = \varphi M_{\text{РТ}}, \quad \varphi = 0,5;$$

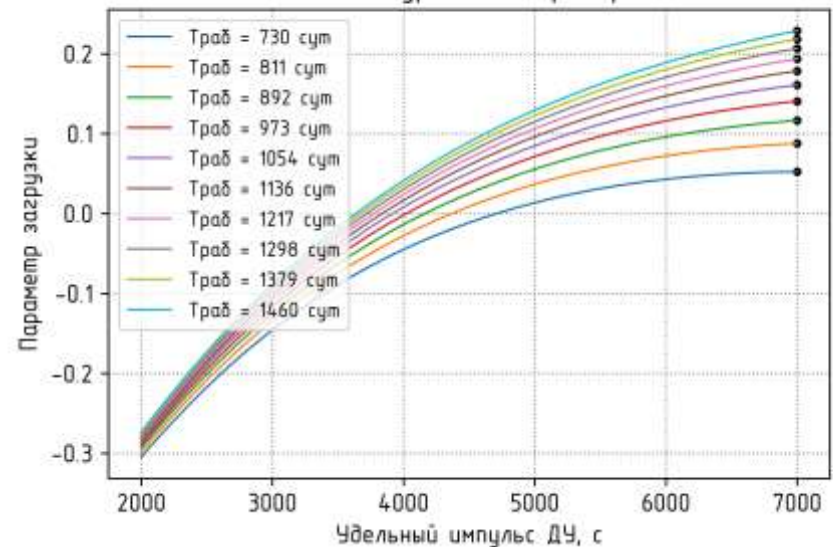
$$M_{\text{ЯЭДУ}} = M_{\text{ДУ}} + M_{\text{ГТУ}} + M_{\text{ХИ}} + M_{\text{ЯР}} + M_{\text{РЗ}} + M_{\text{пр}}$$

В безразмерном виде (M_i/M_0):

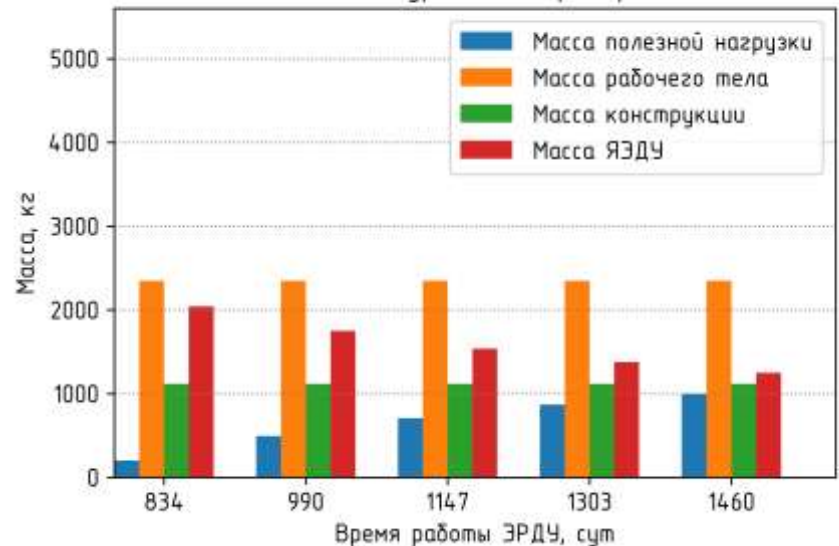
$$1 = \alpha_{\text{ПН}} + \alpha_{\text{кон}} + \alpha_{\text{РТ}} + \alpha_{\text{ЯЭДУ}};$$

Параметр	Величина
Начальная масса КА, кг	5600
Затраты характеристической скорости, км/с	32,810
Время работы ЯЭДУ, сут	1081,9
Оптимальный удельный импульс, с	7000
Электрическая мощность ЯЭДУ, кВт	72,0
Тепловая мощность ЯЭДУ, кВт	288
Удельная масса ЯЭДУ, кг/кВт	21,6
Масса полезной нагрузки, кг	714.7
Масса рабочего тела, кг	2113.9
Масса конструкции, кг	1006.6
Масса ЯЭДУ, кг	1464.7

Зависимость параметра загрузки от удельного импульса
КА с ЯЭДУ с газотурбинным преобразователем

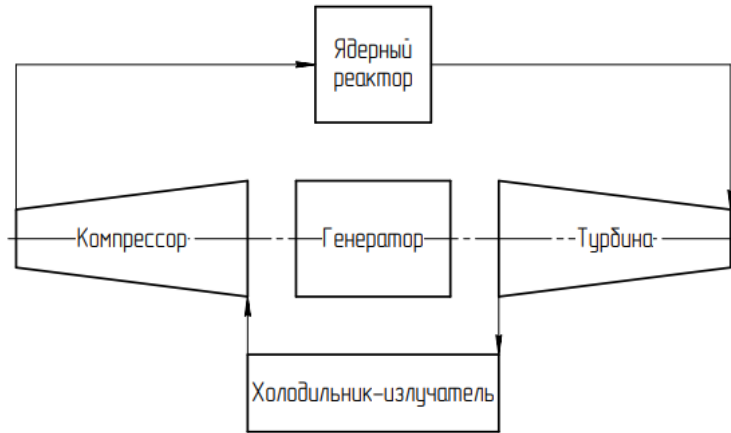


Массы элементов
КА с ЯЭДУ с газотурбинным преобразователем

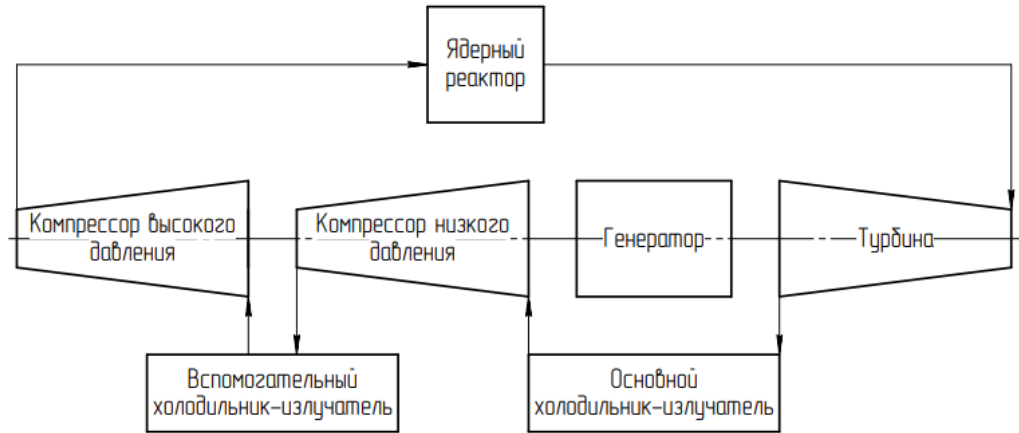


Расчет параметров цикла тепловых схем ГТУ

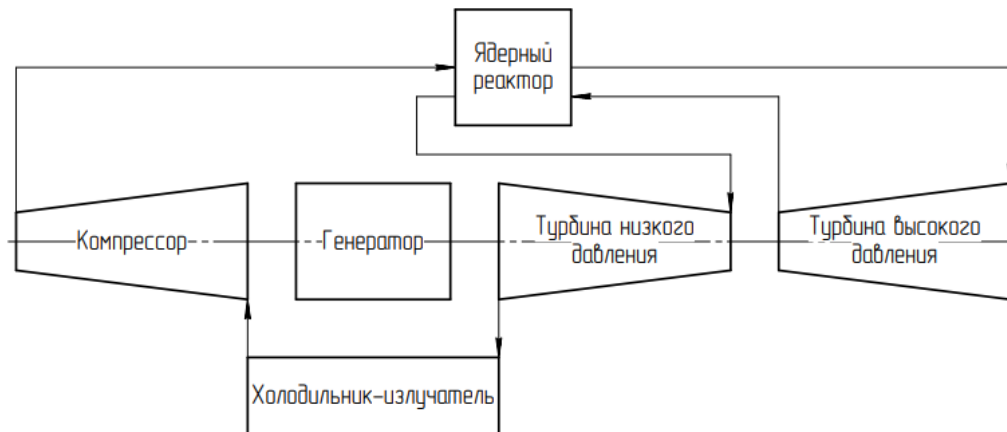
Простейшая схема (№1)



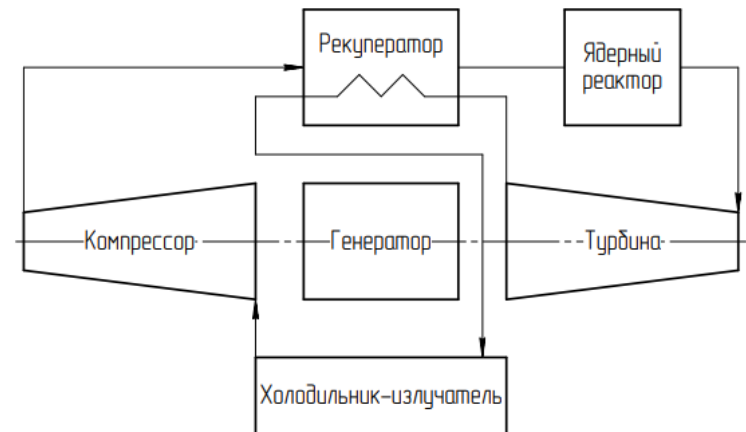
С промежуточным охлаждением (№2)



С промежуточным теплоподводом (№3)



С регенерацией теплоты (№4)



Расчет параметров цикла тепловых схем ГТУ

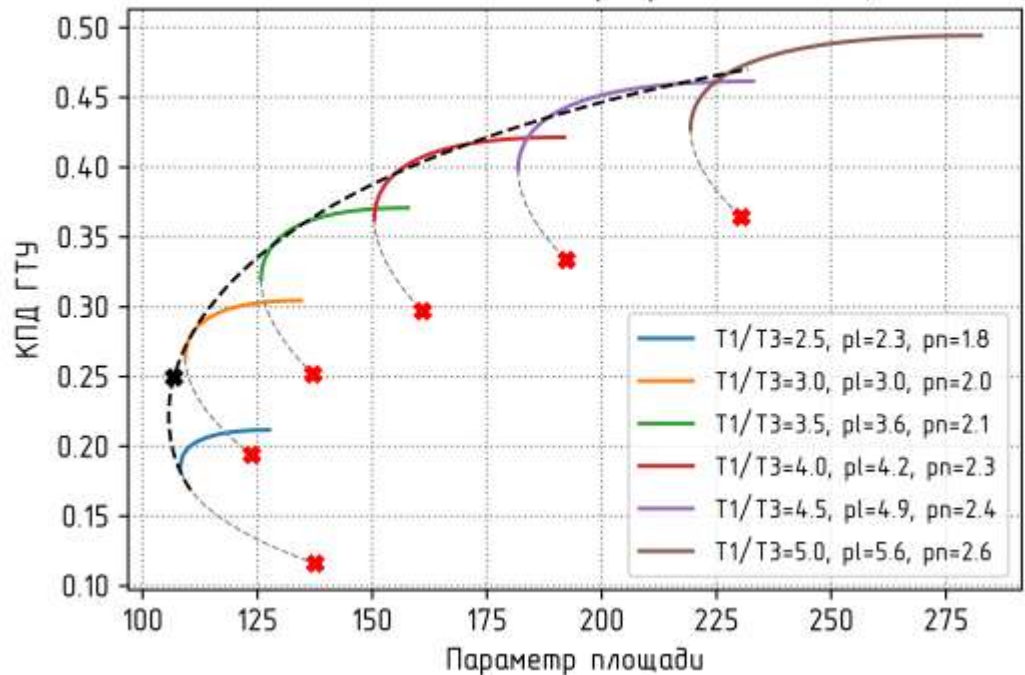
Номер схемы	1	2	3	4
Отношение температур	3,440	3,210	3,200	3,043
Температура на входе в турбину, К	1473			
Температура на входе в реактор, К	825	957	969	976
Степень повышения давления в компрессоре	4,31	5,18 (1,82, 2,89)*	5,29	2,77
Удельная электрическая работа	0,110	0,124	0,132	0,084
Параметр площади	110,4	154,7	81,0	110,9

* – степень повышения давления в компрессорах низкого и высокого давления соответственно.

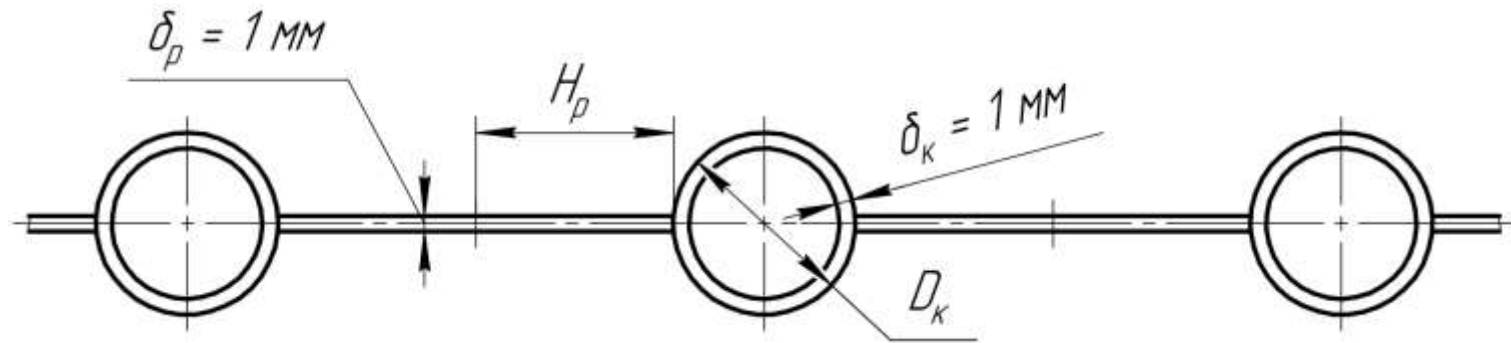
Вариация степени регенерации теплоты:

Степень регенерации	0,72	0,92
Отношение температур	3,043	2,837
Температура на входе в реактор, К	976	1055
Степень повышения давления в компрессоре	2,77	2,62
Удельная электрическая работа	0,084	0,071
Параметр площади	110,9	106,8

Зависимость параметра площади и КПД ГТУ от степени повышения давления при различных T_1/T_3



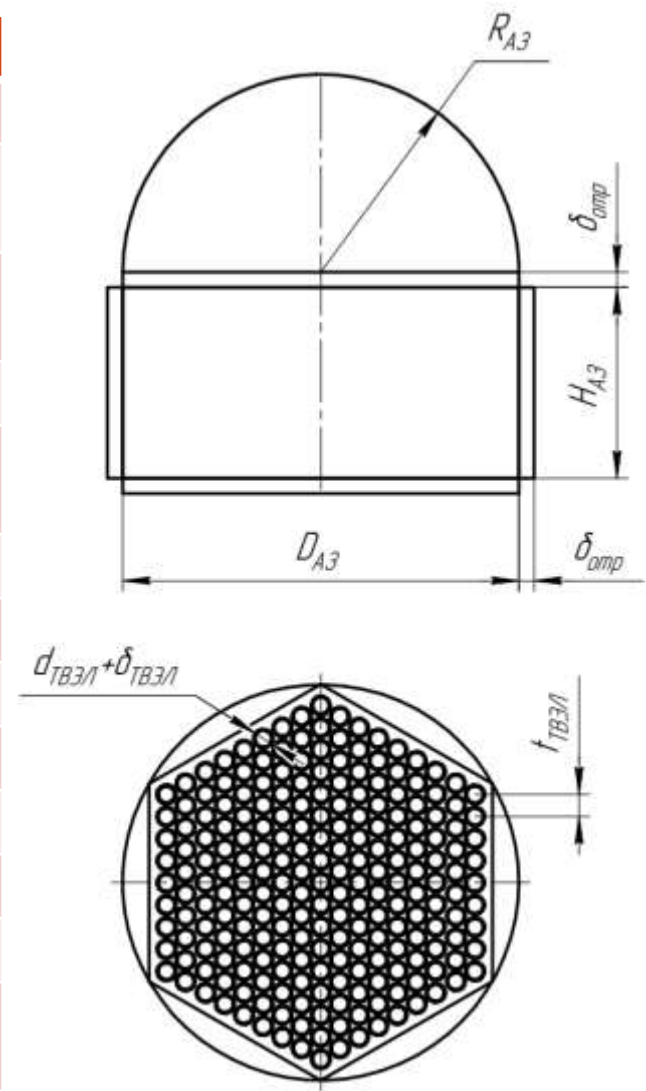
Тепловой расчет панелей ХИ



Материал ребра	Алюминий	Медь	Углеродкно
Внешний диаметр канала, мм	14		
Высота ребра, мм	30		
Молярная масса смеси, кг/моль	39,9		
Длина ХИ, м	15,7	15,4	15,5
Ширина ХИ (для трех панелей), м	2,7	2,7	2,7
Удельная площадь, м ² /кВт	1,797	1,753	1,765
Удельная масса, кг/кВт	4,496	4,466	4,393
Общая площадь ХИ, м ²	129,8	126,2	127,1
Общая масса ХИ, кг	323,7	321,5	316,3

Расчет активной зоны ядерного реактора

Параметр	Величина			
Ядерное топливо	UC+ZrC		UC ₂	
Максимальная температура теплоносителя, °С	1250			
Допустимая температура стенки ТВЭЛа, °С	2700			
Температура стенки ТВЭЛа, °С	2682		2507	
Допустимая температура в центре ТВЭЛа, °С	2900		2350	
Температура в центре ТВЭЛа, °С	2493		2350	
Диаметр активной зоны, мм	290		290	
Высота активной зоны, мм	140		158	
Диаметр ТВЭЛа, мм	12,0		12,0	
Толщина стенки ТВЭЛа, мм	1,2		1,2	
Количество ТВЭЛов	217		217	
Материал отражателя	Be	BeO	Be	BeO
Минимальная толщина отражателя, мм	10	11	10	11
Масса отражателя, кг	4,9	8,1	5,2	8,7
Масса ядерного реактора, кг	115,1	119,3	116,8	121,3

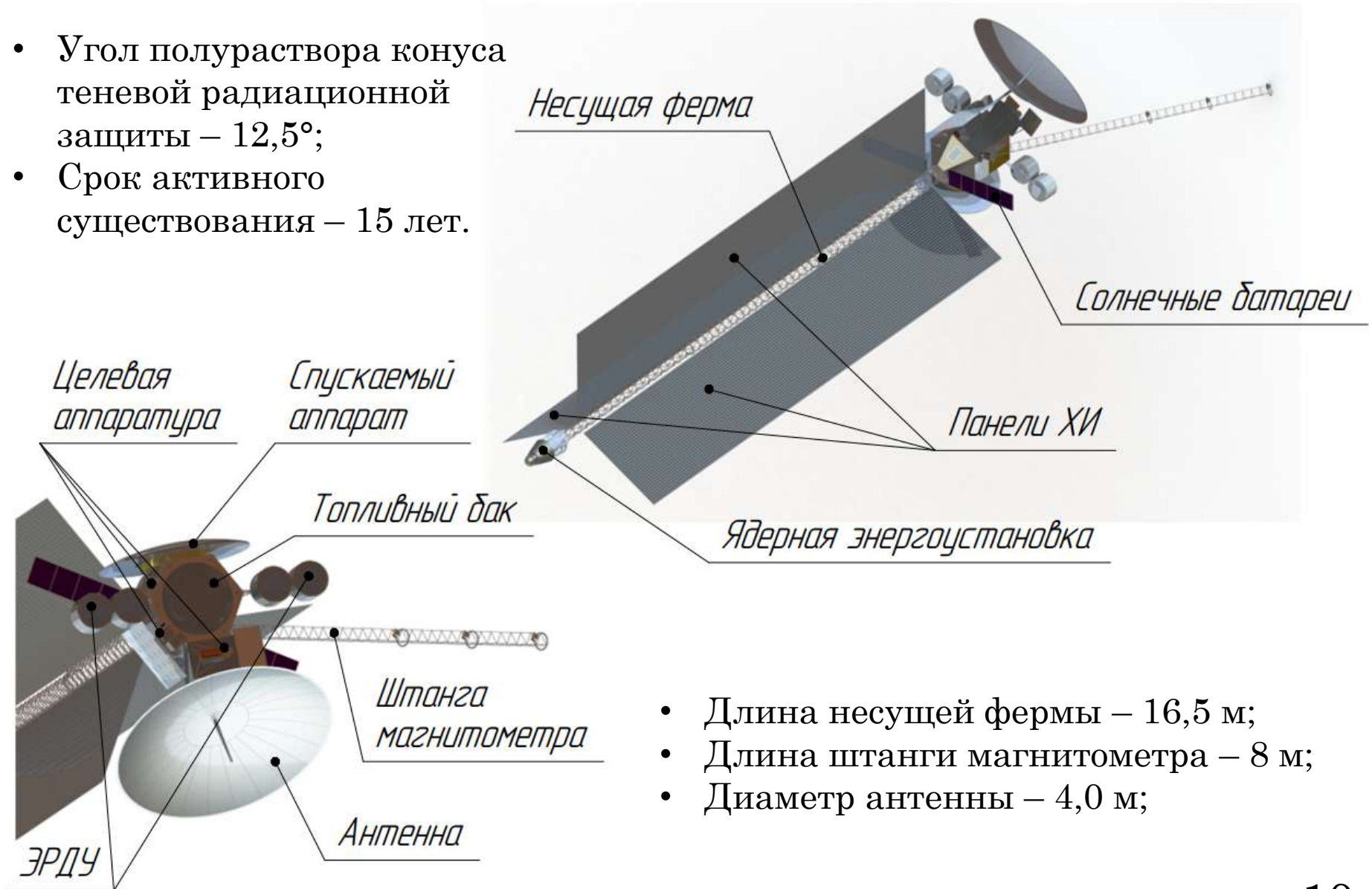


Результаты решения задачи проектирования

Элемент КА	Масса, кг	Габариты, м
Полезная нагрузка	685,8	
ЯЭДУ	815,9	
Ядерный реактор	115,1	Ø0,29 x 0,14
Панели ХИ	321,5 (107,2 x 3)	15,7 x 2,7
Радиационная защита	115,1	Ø0,67 x 0,5
ГТУ	60,0	Ø0,40 x 0,60
Маршевые ЭРДУ	130,0 (32,5 x 4)	Ø0,69 x 0,50
Прочее	74,2	
Рабочее тело	1660,1	
Затраты на выполнение орбитальных маневров	1581,0	
Запас топлива на коррекцию, ориентацию и стабилизацию КА	79,1	
Конструкция	830,1	
АМС с ЯЭДУ	3991,9	27,0 x 6,2 x 7,1

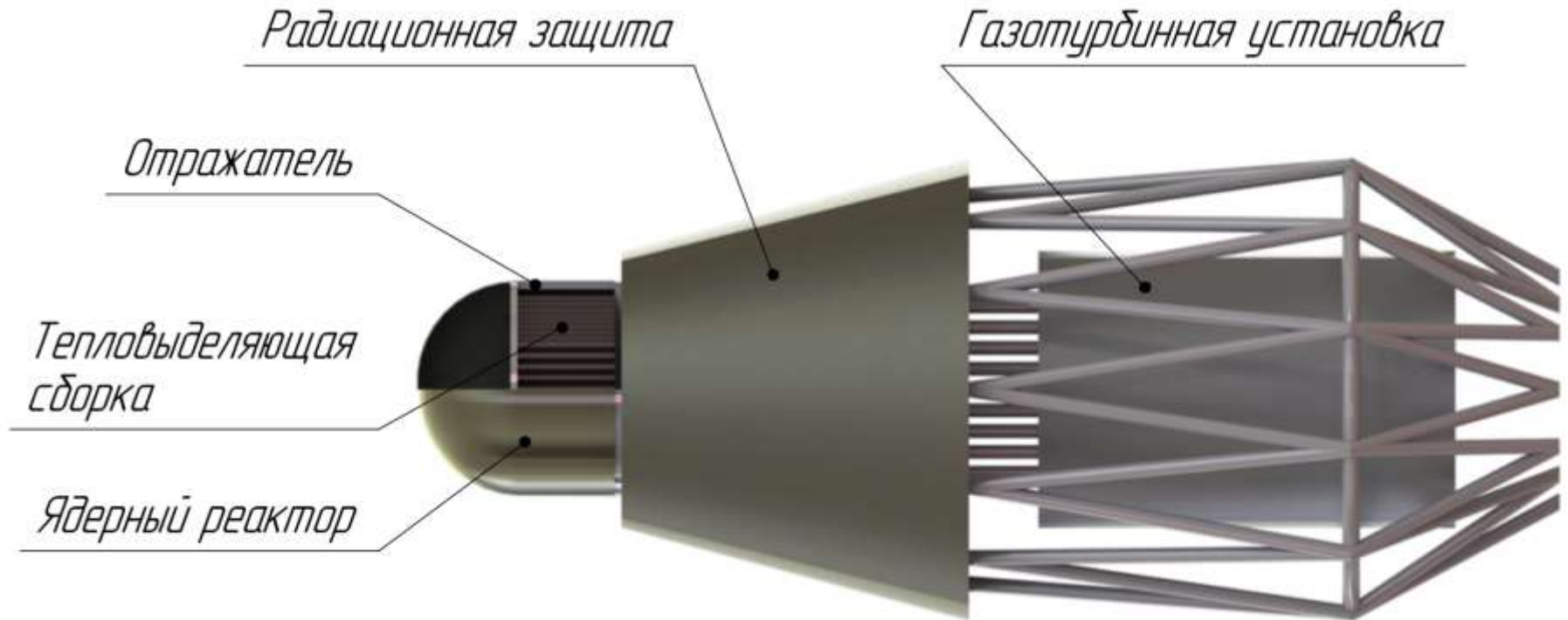
Внешний облик разработанной АМС с ЯЭДУ

- Угол полураствора конуса теневой радиационной защиты – $12,5^\circ$;
- Срок активного существования – 15 лет.



- Длина несущей фермы – 16,5 м;
- Длина штанги магнитометра – 8 м;
- Диаметр антенны – 4,0 м;

Упрощенная схема ядерной энергоустановки



- Электрическая мощность ЯЭДУ – 72 кВт;
- Тепловая мощность ЯЭДУ – 288 кВт;
- КПД ЯЭДУ – 25%;
- Масса ЯЭДУ – 815,9 кг;
- Удельная масса ЯЭДУ – 11,3 кг/кВт.

Выводы

Результаты работы:

- Разработан алгоритм аналитического проектирования КА с ЯЭДУ;
- С помощью разработанного алгоритма проведено проектирование АМС для исследования Сатурна;

Выводы:

- Применение перспективных технологий и материалов позволяет существенно уменьшить массогабаритные характеристики компонентов КА;
- Использование ЭРДУ в составе КА позволило уменьшить массу КА на 1700 кг в сравнении с АМС «Кассини».

Список литературных источников

1. Атамасов В.Д. и др. Ядерные орбитальные комплексы – СПб. : АНО ЛА «Профессионал», 2016. – 800 с.
2. Гришин С.Д. и др. Проектирование космических аппаратов с двигателями малой тяги – М. : Машиностроение, 1990. – 224 с.
3. Кузнецов В.А. Ядерные реакторы космических энергетических установок – М. : Атомиздат, 1977. – 240 с.
4. Арбеков А.Н. и др. Теория и проектирование газотурбинных и комбинированных установок – М. : Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. – 678 с.

Приложение. Подбор ЭРД. Уточнение массоэнергетической модели

Наименование ЭРД	Тяга, мН	Потребляемая мощность, кВт	Удельный импульс, с	Ресурс, ч	Цена тяги, кВт/Н	Цена импульса, Вт/с
СПД-200	488	11	2950	≥ 18000	22,5	3,7
СПД-230	1070	25	3200	≥ 10000	23,4	7,8
СПД-290	1500	30	3000	≥ 27000	20,0	10,0
Д-110	200	4	2250	≥ 5000	20,0	1,8
Д-150	700	15	3100	Не указан	21,4	4,8
ТМ-50	500	50	7000	Не указан	72,0	5,1
VNITAL-160	500	36	7000	Не указан	100,0	7,1
ИД-500	725	35	7000	≥ 20000	48,3	5,0

Уточнение массоэнергетической модели проходит по следующему алгоритму:

